



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**“OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE CAUDALES EN EL PROYECTO
HIDROELÉCTRICO TOACHI PILATÓN, MEDIANTE PROGRAMACIÓN
DINÁMICA”**

NOMBRE

ALEXIS LEANDRO TUZA TACURI

DIRECTOR: ING. CARLOS LUIS NAVAS

QUITO, 2015

DEDICATORIA

A mi madre Gloria por dejarme la mejor herencia que es la educación, por apoyarme en todos mis proyectos, por nunca rendirse frente a las adversidades, por mostrarme que el trabajo duro rinde frutos y por todas las malas noches.

AGRADECIMIENTOS

*A mis tíos Ramiro, Marcia e Iván y a mi hermana Gabriela por todo el apoyo incondicional.
A mi director y amigo el Ing. Carlos Luis Navas por guiarme y ayudarme en esta disertación.
A todos mis amigos, especialmente a Mariana, Jonathan, Nathalie y Ernesto por escucharme
y apoyarme.*

RESUMEN

La presente disertación trata la optimización de la operación del embalse Toachi considerando que los caudales de los ríos Toachi y Pilatón son variables, por lo tanto las pérdidas en los diferentes tramos del proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón son variables.

En el primer capítulo se realiza una breve explicación sobre lo que es la programación dinámica, además se presenta en detalle la conformación del proyecto con sus respectivas geometrías con el fin de obtener el coeficiente de pérdidas K .

En el segundo capítulo se presenta con detalle lo que es la programación dinámica y los tipos que existen como: determinística discreta, determinística continua, estocástica implícita y estocástica explícita.

En el tercer capítulo se presenta el proceso paso a paso que se llevó a cabo para la optimización mediante el uso de programación dinámica determinística discreta utilizando la herramienta Solver de Microsoft Excel.

En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos tras el análisis de las series históricas que se tienen.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones a las que se llegaron y se realizan una recomendación para cada conclusión.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
ÍNDICE DE FOTOS.....	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	VIII
INDICE DE GRÁFICOS	IX
INDICE DE ANEXOS.....	X
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción al uso de la programación dinámica	1
1.2. Antecedentes de la central hidroeléctrica Toachi-Pilatón.....	2
1.2.1. Conceptos y fórmulas generales.....	5
1.2.1.1. Sistema Hidráulico	5
1.2.1.2. Radio Hidráulico.....	5
1.2.1.3. Caudal.....	6
1.2.1.4. Ecuación de Manning	6
1.2.1.5. Pérdidas por fricción.....	7
1.2.1.6. Altura neta	7
1.2.2. Geometría y pérdidas en el tramo Pilatón-Sarapullo	8
1.2.2.1. Pérdidas localizadas.....	11
1.2.2.1.1. Rejilla.....	11
1.2.2.1.2. Vertedero de Cimacio con Perfil tipo Creager.....	13
1.2.2.2. Pérdidas por fricción.....	14
1.2.2.2.1 Desarenador y embocadura.....	14

1.2.2.2.2. Túnel de presión, chimenea superior, tubería de presión y chimenea inferior	17
1.2.2.3. Valor del coeficiente de pérdidas K para el aprovechamiento Pilatón-Sarapullo	19
1.2.3. Geometría y pérdidas en el tramo Toachi-Alluriquín	20
1.2.3.1. Pérdidas por fricción.....	20
1.2.3.2. Valor del coeficiente K para el aprovechamiento Toachi-Alluriquín	22
CAPÍTULO 2: BASE CONCEPTUAL	23
2.1. Programación Dinámica.....	23
2.1.1. Programación Dinámica Determinística Discreta	25
2.1.2. Programación Dinámica Determinística Continua.....	27
2.1.3. Programación Dinámica Estocástica Implícita (Método de Monte Carlo)	28
2.1.4. Programación Dinámica Estocástica Explícita (Método de Cadenas de Markov)...31	
2.2. Escenarios Hidrológicos	32
2.2.1. Año seco	32
2.2.2. Año lluvioso	33
2.2.3. Año medio	33
2.2.4. Comparación entre años seco, lluvioso y medio	34
CAPÍTULO 3: OPTIMIZACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA.....	37
3.1. Recopilación y restricciones	37
3.1.1. Restricciones del tramo Pilatón-Sarapullo	37
3.1.2. Restricciones del tramo Toachi-Alluriquín	38
3.2. Optimización de los Caudales de la Captación y del Embalse Toachi	39
3.3. Proceso de Optimización Utilizando la Herramienta Solver	41

CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	48
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1. Conclusiones	51
5.2. Recomendaciones	52
ANEXOS.....	54
BIBLIOGRAFÍA	83

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Redistribución anual de caudales utilizando Solver	43
Cuadro 2: Redistribución mensual de caudales utilizando Solver para agosto.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema hidráulico del proyecto.....	4
Figura 2: Vista en planta del desarenador y la embocadura	9
Figura 3: Vista lateral del desarenador y la embocadura.....	10
Figura 4: Vista frontal de la rejilla.....	11
Figura 5: Vista lateral de la rejilla	11
Figura 6: Vista en corte del desarenador	14
Figura 7: Vista en corte del desarenador	15
Figura 8: Esquema de la tubería de presión y las chimeneas de equilibrio	18

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cálculo de la rejilla.....	12
Tabla 2 Cálculo del perfil Creager	13
Tabla 3 Cálculo de pérdidas por fricción.....	16
Tabla 4: Proceso de optimización.....	40
Tabla 5: Optimización de los caudales del mes de agosto	46
Tabla 6: Resultado del año de la primera serie optimizado.....	47
Tabla 7: Energía de las series con $F_p=0,85$	50
Tabla 8: Energía de las series con $F_p=1$	50

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1: Ubicación del proyecto	2
Foto 2: Esquema del proyecto	3

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1. 1. Radio hidráulico	5
Ec. 1. 2. Caudal.....	6
Ec. 1. 3. Manning.....	6
Ec. 1. 4. Pérdidas por fricción	7
Ec. 1. 5. Altura neta	7
Ec. 1. 6. Altura neta	7
Ec. 1. 7. Coeficiente de pérdidas	8

Ec. 2.1. Programación dinámica.....	24
Ec. 2.2. Balance de masas.....	24
Ec. 2.3. Restricción de máxima descarga	24
Ec. 2.4. Restricción de almacenamiento	24
Ec. 2.5. Restricción de descarga	24
Ec. 2.6. Programación dinámica determinística discreta.....	25
Ec. 2.7. Programación dinámica determinística discreta.....	26
Ec. 2.8. Programación dinámica determinística discreta.....	26
Ec. 2.9. Programación dinámica determinística continua	27
Ec. 2.10. Programación dinámica determinística continua	28
Ec. 2.11. Programación dinámica determinística continua	28
Ec. 2.12. Programación dinámica estocástica implícita	29
Ec. 2.13. Programación dinámica estocástica implícita	29
Ec. 2.14. Programación dinámica estocástica implícita	29
Ec. 2.15. Programación dinámica estocástica implícita	29
Ec. 2.16. Programación dinámica estocástica implícita	30
Ec. 2.17. Programación dinámica estocástica implícita	31
Ec. 2.18. Programación dinámica estocástica explícita.....	31
Ec. 3. 1. Restricción del tramo Pilatón-Sarapullo.....	37
Ec. 3. 2. Restricción del tramo Toachi-Alluriquín	38
Ec. 3. 3. Restricción del tramo Toachi-Alluriquín	39

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparación del río Pilatón.....	35
Gráfico 2: Comparación del río Toachi.....	36

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Año seco del río Pilatón (m^3/s)	55
Anexo 2: Año seco del río Toachi (m^3/s)	56
Anexo 3: Año lluvioso del río Pilatón (m^3/s)	57
Anexo 4: Año lluvioso del río Toachi (m^3/s)	58
Anexo 5: Año medio del río Pilatón (m^3/s)	59
Anexo 6: Año medio del río Toachi (m^3/s)	60
Anexo 7: Serie histórica del año 1	61
Anexo 8: Serie histórica del año 2	62
Anexo 9: Serie histórica del año 3	63
Anexo 10: Serie histórica del año 4	64
Anexo 11: Serie histórica del año 5	65
Anexo 12: Serie histórica del año 6	66
Anexo 13: Serie histórica del año 7	67
Anexo 14: Serie histórica del año 8	68
Anexo 15: Serie histórica del año 9	69
Anexo 16: Serie histórica del año 10	70
Anexo 17: Serie histórica del año 11	71
Anexo 18: Serie histórica del año 12	72
Anexo 19: Serie histórica del año 13	73
Anexo 20: Serie histórica del año 14	74
Anexo 21: Serie histórica del año 15	75
Anexo 22: Serie histórica del año 16	76
Anexo 23: Serie histórica del año 17	77
Anexo 24: Serie histórica del año 18	78
Anexo 25: Serie histórica del año 19	79
Anexo 26: Serie histórica del año 20	80
Anexo 27: Serie histórica del año 21	81
Anexo 28: Serie histórica del año 22	82

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción al uso de la programación dinámica

En el periodo después de la segunda guerra mundial, se notó que existían numerosas actividades que podían ser clasificadas como procesos de decisión por etapas. Pronto se observó que existían problemas matemáticos que no se podían resolver con análisis convencionales. Las técnicas clásicas del cálculo y el cálculo de variaciones eran ocasionalmente útiles en estas nuevas áreas, estando claramente limitadas por su alcance y su versatilidad, y definitivamente no estaban dando buenos resultados cuando se trataba de resultados numéricos.

El reconocimiento de estos hechos, llevó a la creación de nuevos métodos y teorías matemáticas, entre estas se encontraba la teoría de la programación dinámica, un acercamiento en base al uso de ecuaciones funcionales y el principio de optimización, con potencial en el uso emergente de los computadores. La programación dinámica se introdujo como una nueva teoría que ofrecía acercamientos matemáticos versátiles a diversas situaciones complejas que envuelven procesos de decisión por etapas; el método presentado por esta teoría continua siendo ampliamente conocido y utilizado como una herramienta útil para resolver problemas complejos.

En cuanto a los problemas en el manejo de recursos hídricos que puedan ser optimizados, se trata de determinar los valores óptimos de las variables de decisión, es decir, de aquellas variables que pueden ser controladas o cambiadas. En algunos casos estos problemas pueden ser descompuestos en partes, con una estructura secuencial, en donde la decisión para una parte del problema afecta a las decisiones en todas sus otras partes, tanto aguas arriba como aguas abajo.

1.2. Antecedentes de la central hidroeléctrica Toachi-Pilatón

El proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón se encuentra entre las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi. Está diseñado para entregar una potencia de 254 MW aprovechando los caudales de los ríos Toachi y Pilatón.

Foto : Ubicación del proyecto



Fuente: http://www.energia.gob.ec/wp-content/uploads/2015/05/TOACHI_PILATON.png

A continuación se presenta el esquema del proyecto hidroeléctrico completo, al cual se lo puede descomponer en dos tramos para facilitar su estudio: Pilatón-Sarapullo y Toachi-Alluriquín, se debe tomar en cuenta que la descarga de la casa de máquinas Sarapullo se encuentra interconectada con el túnel de presión Toachi-Alluriquín.

Foto : Esquema del proyecto



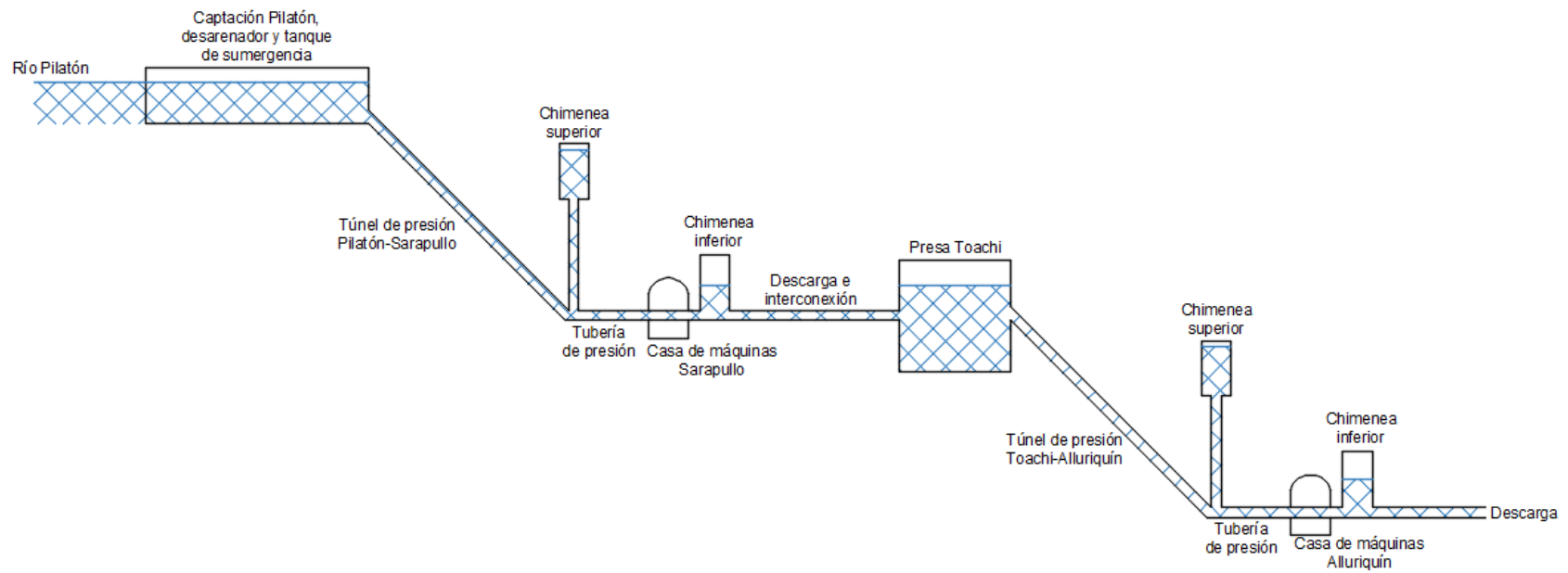
Fuente: <http://www.energia.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/Captura-de-pantalla-2014-06-06-a-las-6.23.10-AM.png>

El tramo Pilatón-Sarapullo comprende: captación Pilatón, desarenador, tanque de sumergencia, túnel de presión Pilatón-Sarapullo, chimenea superior, tubería de presión, casa de máquinas Sarapullo, chimenea inferior y descarga.

El tramo Toachi-Alluriquín comprende: presa, túnel de presión Toachi-Alluriquín, chimenea superior, tubería de presión, casa de máquinas Alluriquín, chimenea inferior y descarga.

Cabe mencionar que para la presente disertación se trabajó con información técnica y planos que fueron provistos por HIDROTOAPI S.A. Por consiguiente, a continuación en la figura 1 se muestra el esquema hidráulico del proyecto en base al análisis de la información de la que se dispone:

Figura : Esquema hidráulico del proyecto



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

1.2.1. Conceptos y fórmulas generales

1.2.1.1. Sistema Hidráulico

Como concepto general se debe mencionar que existen pérdidas de carga por fricción y pérdidas de carga localizadas. Las pérdidas de carga por fricción se dan entre el flujo y la pared del conducto, debido a la rugosidad de las paredes. Las pérdidas de carga localizadas ocurren cuando la sección cambia muy bruscamente su área transversal o es una sección con una geometría bastante compleja.

Dentro de los conceptos que se deben manejar para el cálculo de pérdidas se encuentran el radio hidráulico y el caudal, los cuales al ser reemplazados en la ecuación de Manning nos proveen la herramienta para el cálculo de pérdidas.

1.2.1.2. Radio Hidráulico

Es la relación entre el área de la sección y el perímetro mojado.

Ec. 1.

$$Rh = \frac{A}{Pm}$$

Donde:

Rh = radio hidráulico.

A = área de la sección con agua.

Pm = perímetro mojado.

1.2.1.3. Caudal

Caudal es la relación entre la velocidad promedio del flujo y área de la sección.

Ec. 1.

$$Q = V * A$$

Donde:

Q = caudal.

V = velocidad promedio.

1.2.1.4. Ecuación de Manning

Ecuación de Manning (1889): Puede ser utilizada para el cálculo de pérdidas de carga por fricción en tuberías y canales abiertos.

Ec. 1.

$$V = \frac{1}{n} * R h^{2/3} * \left(\frac{hf}{L} \right)^{1/2}$$

Donde:

hf = pérdida de carga.

n = coeficiente de Manning.

L = longitud del tramo.

1.2.1.5. Pérdidas por fricción

Para el cálculo de pérdidas por fricción se utilizará la ecuación de Manning en función del caudal:

Ec. 1.

$$hf = \frac{Q^2 * n^2 * L * Pm^{4/3}}{A^{10/3}}$$

1.2.1.6. Altura neta

A la diferencia entre dos niveles se la conoce como altura bruta y no considera ningún tipo de pérdida. Sin embargo la altura neta si considera toda clase de pérdidas como se muestra en la ecuación 1.5:

Ec. 1.

$$Hn = Nivel\ captación - Nivel\ descarga - \sum pérdidas$$

Donde:

Hn = altura neta

Otra forma en la que se puede expresar la altura neta y que es más práctica cuando se calcula pérdidas para diferentes caudales es la siguiente:

Ec. 1.

$$Hn = Nivel\ captación - Nivel\ descarga - K * Q^2$$

Donde:

K = coeficiente de pérdida

Por lo tanto si igualamos la ecuación 5 con la ecuación 6 obtenemos una forma de calcular el factor K , lo cual nos facilitará bastantes cálculos en capítulos posteriores.

Ec. 1.

$$K = \frac{\Sigma \text{pérdidas}}{Q^2}$$

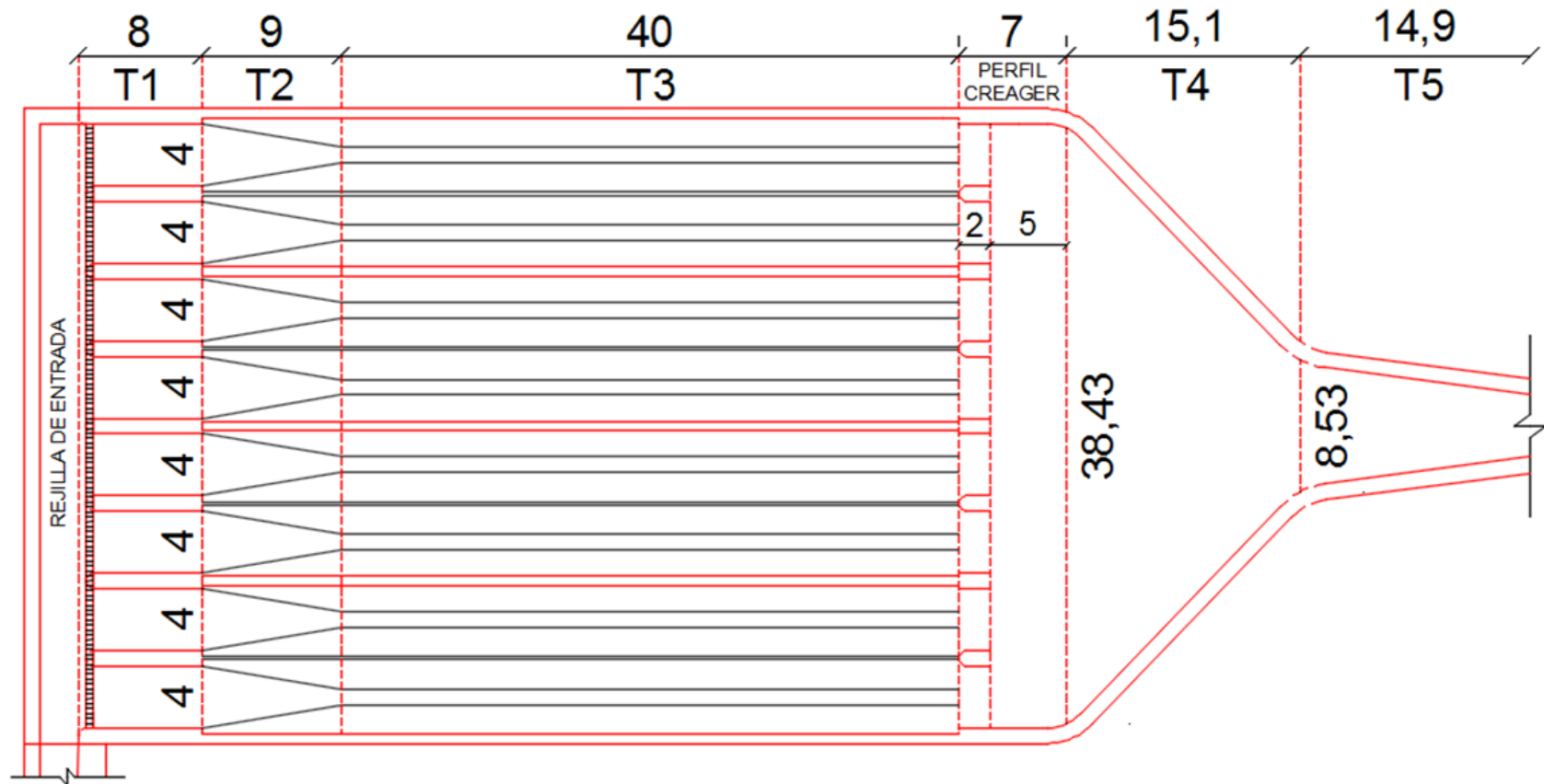
1.2.2. Geometría y pérdidas en el tramo Pilatón-Sarapullo

Este tramo se encuentra diseñado para que en operación, su caudal máximo sea de 40 m³/s y su caudal mínimo sea de 6 m³/s. Como se indicó en el numeral 1.2.1.1. se considerarán pérdidas por fricción y pérdidas localizadas. Las pérdidas por fricción se realizan cuando la geometría no es muy compleja; por otra parte, en pérdidas localizadas la geometría suele ser compleja como por ejemplo una rejilla o un vertedero y se necesitan realizar consideraciones especiales.

Para pérdidas por fricción, debido a que la geometría del desarenador es variable, se ha optado por dividir al desarenador en 5 tramos para facilitar el cálculo.

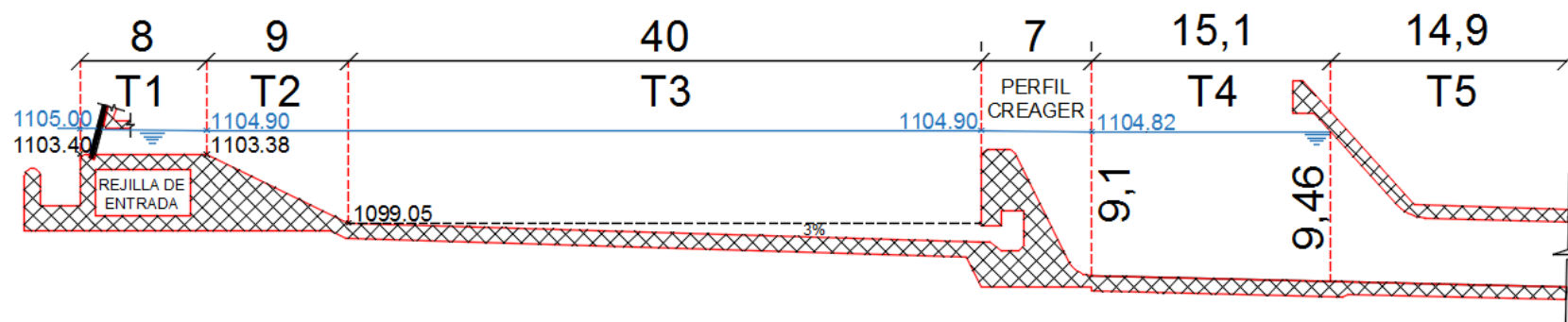
Para pérdidas localizadas se tienen dos elementos: la rejilla y un vertedero de Cimacio con perfil tipo Creager. La rejilla previene la entrada de sólidos con un ancho determinado al desarenador, el vertedero permite y regula el paso del agua garantizando seguridad y poca variación en su nivel; el perfil Creager se refiere a la forma constitutiva del vertedero.

Figura : Vista en planta del desarenador y la embocadura



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Figura : Vista lateral del desarenador y la embocadura



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

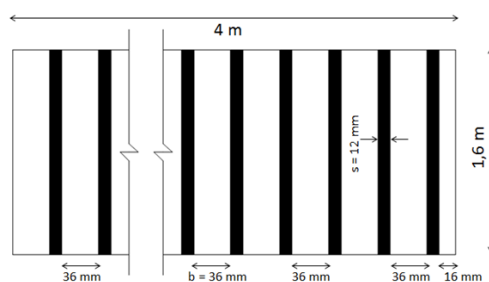
1.2.2.1. Pérdidas localizadas

Las pérdidas localizadas a tomarse en cuenta son la rejilla de entrada al desarenador y el perfil Creager a la salida del desarenador.

1.2.2.1.1. Rejilla

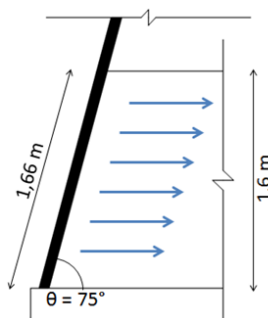
Existen 8 rejillas con la geometría que se presenta a continuación, separadas por un muro de 1 metro de ancho.

Figura : Vista frontal de la rejilla



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Figura : Vista lateral de la rejilla



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Dada la geometría presentada y considerando los datos, para este tramo se tiene una pérdida de 8cm, a continuación se presenta el resumen de la pérdida de carga:

Tabla : Cálculo de la rejilla

**DISEÑOS DEFINITIVOS PROYECTO HIDROELECTRICO TOACHI PILATÓN
CAPTACIÓN PILATÓN**

REJILLA

Datos:

Caudal de captación (m³/s)	Q	40,00
Alto de la rejilla (m)	Hr	1,60
Espesor de barrotes (m)	s	0,012
Espaciamiento entre barrotes (m)	b	0,036
Angulo inclinación rejilla (°)	θ	75,00
Velocidad de flujo a través de barrotes (m/s)	V	1,04
Coefficiente de forma de barrotes	Cf	2,42

Resultados:

Parámetros	Variación de obstrucción		
	1	2	3
Factor de obstrucción (%)	0	10	20
Altura de la reja	1,600	1,600	1,600
Ancho neto sin considerar obstrucción	24,038	24,038	24,038
Area neta considerando obstrucción	38,462	34,615	30,769
Número de vanos	667,000	667,000	667,000
Número de barrotes	666,000	666,000	666,000
Ancho bruto real	32,004	32,004	32,004
Número de módulos	8,000	8,000	8,000
Ancho de cada módulo	4,000	4,000	4,000
Número de pilas intermedias	7,000	7,000	7,000
Ancho de cada pila	1,000	1,000	1,000
Ancho bruto total	39,004	39,004	39,004
Velocidad de flujo a través de barrotes (m/s)	1,040	1,156	1,300
Pérdida por entrada	0,055	0,068	0,086
Pérdida máxima por rejilla	0,030	0,037	0,047
Pérdida total	0,085	0,105	0,133
Nivel cresta de vertedero principal	1100,000	1100,000	1100,000
Nivel máximo crecida	1105,000	1105,000	1105,000
Nivel normal de operación	1105,000	1105,000	1105,000
Nivel umbral de rejilla	1103,400	1103,400	1103,400
Nivel plataforma de operación de rejilla	1108,000	1108,000	1108,000

Fuente: HIDROTOAPI S.A. (2010). *Memoria Técnica - Diseño Hidráulico Captación Pilatón*. Santo Domingo de los Colorados.

1.2.2.1.2. Vertedero de Cimacio con Perfil tipo Creager

El vertedero de Cimacio con perfil tipo Creager a la salida del desarenador tiene la geometría mostrada en la figura 2, en su parte superior ambos vértices tienen una curvatura de 0,5 metros de radio y en su parte inferior derecha el vértice tiene una curvatura de 1,5 metros de radio.

El nivel del agua se encuentra 1,2 m sobre el perfil en su inicio, cuando el caudal es de 40 m³/s. Por consiguiente, con esta geometría se presente el resumen del cálculo del perfil y la pérdida de carga se puede apreciar gracias a la diferencia de niveles a la entrada del perfil y a la salida del mismo. Resultando en una pérdida de carga de 8 cm.

Tabla Cálculo del perfil Creager

DISEÑOS DEFINITIVOS PROYECTO HIDROELECTRICO TOACHI PILATÓN TOMA PILATÓN

Parámetros del vertedero de descarga de los desarenadores

Longitud del vertedero (m)	Lv	4,000
Caudal de diseño (m ³ /s)	Qv	5,000
Altura del umbral (m)	w	3,300
Nivel agua en embocadura (msm)		1104,820
Nivel de agua en desarenador (msnm)		1104,900
Nivel cresta del vertedero (msm)		1103,700
Carga de agua sobre vertedero (m)	h	1,200
Coefficiente de descarga (Fórmula de Rehbock)	C	1,871
Espesor de pared de vertedero	e	2,000
	e/h	1,667
Número de contracciones	N	1,000
Coefficiente de contracción	Cc	0,100
$Lv' = Lv - Cc * h$	Lv'	3,880
$\epsilon 1 = 0,7 + 0,185 / (e/h)$	$\epsilon 1$	0,811
Sumergencia (m)	h'	1,120
$(h - h') / h$		0,067
$\epsilon 2$	$\epsilon 2$	0,660
$Qv = \epsilon 1 * \epsilon 2 * C * Lv' * h^{3/2}$	Qv	5,109
Velocidad de flujo sobre vertedero (m/s)	Vv	1,064

Si $e/h < 0,67$ se tiene un vertedero de pared delgada

Fuente: HIDROTOAPI S.A. (2010). *Memoria Técnica - Diseño Hidráulico Captación Pilatón*. Santo Domingo de los Colorados.

1.2.2.2. Pérdidas por fricción

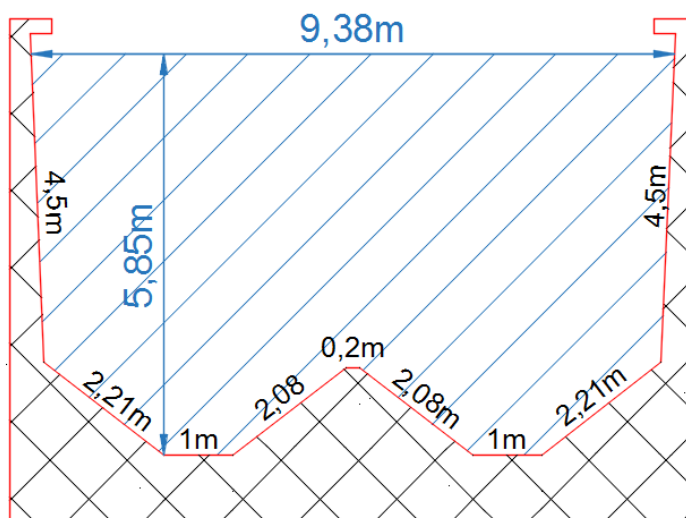
1.2.2.2.1 Desarenador y embocadura

Para el cálculo de pérdidas por fricción se dividió al desarenador y a la embocadura en 5 tramos, con la finalidad de facilitar su estudio.

El primer tramo consiste de 8 cámaras rectangulares separadas por un muro de 1 m de ancho con una medida de 4 m de ancho y 1,60 m de alto. La altura de agua al inicialmente es de 1,60 m pero al pasar por la rejilla se produce una pérdida de 8cm, por lo tanto la altura de agua después de la rejilla es de 1,52 m.

El segundo tramo consiste de 4 cámaras que cambian su sección de rectangular a irregular progresivamente. Inicialmente la altura del agua es 1,52 m y la base de 9 m. Al final del tramo la geometría es como se muestra en la figura 6.

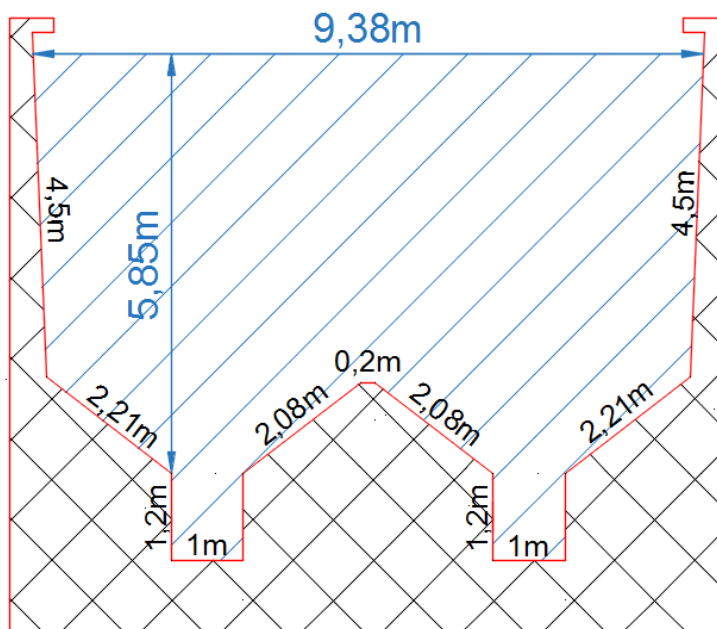
Figura : Vista en corte del desarenador



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

El tercer tramo inicialmente es como se muestra en la figura 6, y cambia progresivamente hasta que finalmente su geometría es como se muestra en la figura 7.

Figura : Vista en corte del desarenador



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

El cuarto tramo se encuentra después del perfil Creager. La geometría inicial del tramo es aproximadamente rectangular de 4,1 m de altura de agua por 38,43 m de base y va variando. La geometría final es aproximadamente rectangular 9,46 m de altura de agua por 8,53 m de base.

El quinto tramo se encuentra totalmente lleno de agua, su geometría inicial es aproximadamente rectangular de 9,46 m de altura por 8,53 m de ancho. Su sección final

corresponde a una sección circular llena de 3,8 m de diámetro que a su vez es el diámetro del túnel de presión.

A continuación se presenta un cuadro con el resumen del cálculo de las pérdidas por fricción en base a las geometrías presentadas en el numeral 1.2.2.2.1. y las ecuaciones 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4.

Tabla Cálculo de pérdidas por fricción

	Unidad	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5
Caudal	m ³ /s	40	40	40	40	40
n	-	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
L	m	8,00	9,99	40,02	15,10	14,92
Pm al inicio del tramo	m	56,32	48,16	79,12	56,36	35,98
Pm al final del tramo	m	56,32	79,12	98,32	27,45	12,88
Pm promedio	m	56,32	63,64	88,72	41,91	24,43
A al inicio del tramo	m ²	48,64	54,72	192,12	349,71	80,69
A al final del tramo	m ²	48,64	195,12	204,72	80,69	13,20
A promedio	m ²	48,64	124,92	198,42	215,20	46,95
hf	m	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

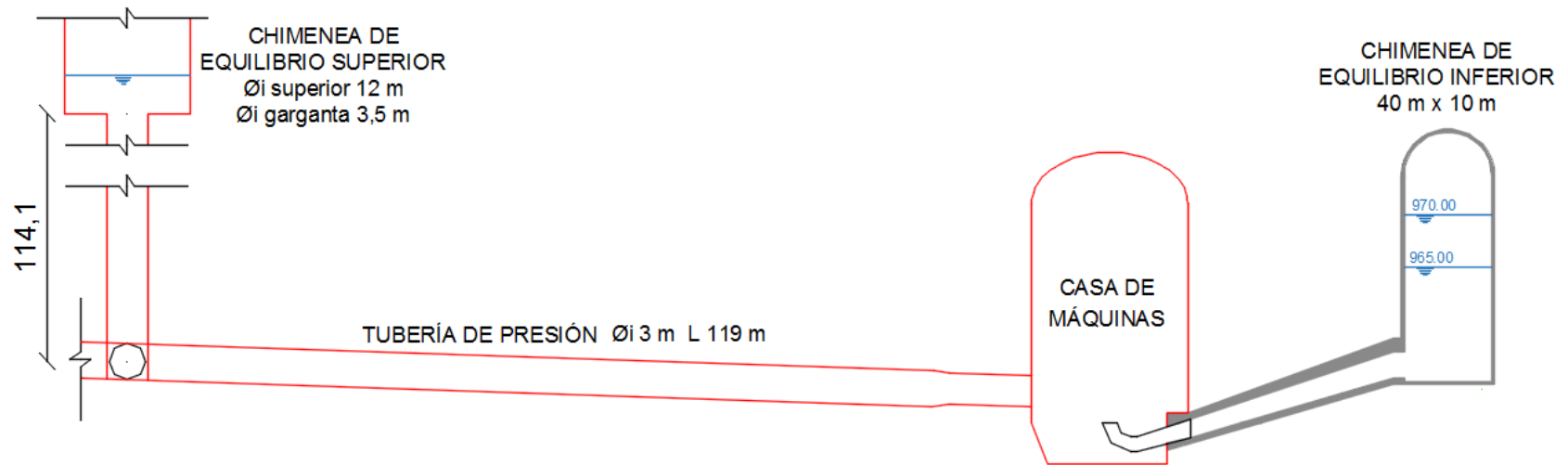
Como se puede apreciar en la tabla 3 las pérdidas por fricción en tramos relativamente cortos y de sección casi no generan pérdidas.

1.2.2.2.2. Túnel de presión, chimenea superior, tubería de presión y chimenea inferior

El túnel de presión es revestido de hormigón con una longitud de 5,9 km, un diámetro interior de 3,80 m en caso de ser excavación convencional, este tramo funciona a presión.

$$hf = \frac{40^2 * 0,013^2 * 5910 * (\pi * 3,8)^{4/3}}{\left(\pi * \frac{3,8^2}{4}\right)^{10/3}} = 13,30 \text{ m}$$

Figura : Esquema de la tubería de presión y las chimeneas de equilibrio



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

La chimenea de equilibrio superior se compone de dos secciones circulares de hormigón blindadas con acero. La sección inferior llamada garganta tiene 114,1 m de alto con un diámetro interior de 3,5 m. La sección superior tiene diámetro interno de 12 m donde las pérdidas generadas serán casi nulas.

$$hf = \frac{40^2 * 0,013^2 * 114,1 * (\pi * 3,5)^{4/3}}{\left(\pi * \frac{3,5^2}{4}\right)^{\frac{10}{3}}} = 0,4 \text{ m}$$

La tubería de presión es de acero por lo tanto el valor del coeficiente n de Manning es de 0,012 a diferencia del valor para el hormigón de 0,013. Este elemento tiene una longitud de 119 m y un diámetro interno de 3 m.

$$hf = \frac{40^2 * 0,012^2 * 119 * (\pi * 3)^{4/3}}{\left(\pi * \frac{3^2}{4}\right)^{\frac{10}{3}}} = 0,81 \text{ m}$$

La chimenea inferior es una cámara de oscilación revestida de hormigón con base de 40 m x 10 m en planta donde las pérdidas generadas serán aproximadamente nulas.

1.2.2.3. Valor del coeficiente de pérdidas K para el aprovechamiento Pilatón-Sarapullo

Este tramo entrega su máxima potencia, cuando el nivel de ingreso se encuentra a 1105 msnm y el nivel de descarga a 965 msnm, con un caudal de 40 m³/s.

Como resultado en las tablas 1 y 2 provistas por HIDROTOAPI S.A. tenemos que por pérdidas localizadas, existe una pérdida de carga de 0,18 m. En base a la sumatoria de las pérdidas por fricción, se tiene una pérdida de carga de 14,51 m. Sumando ambas, tenemos un total de 14,69 m de pérdida de carga total en este tramo, por lo tanto el valor de K es:

$$K = \frac{14,69}{40^2} = 0,0092$$

1.2.3. Geometría y pérdidas en el tramo Toachi-Alluriquín

En el caso de este tramo al no tratarse de una toma lateral sino de un embalse tácitamente, no existen pérdidas localizadas y las únicas que se tiene son pérdidas por fricción.

1.2.3.1. Pérdidas por fricción

Luego de la chimenea inferior, el caudal turbinado ingresa al túnel de descarga, que se conecta a la presa Toachi, el mismo que se encuentra revestido de hormigón y tiene una longitud de 500 m y un diámetro interno de 3,8 m.

$$hf = \frac{40^2 * 0,013^2 * 500 * (\pi * 3,8)^{4/3}}{\left(\pi * \frac{3,8^2}{4}\right)^{\frac{10}{3}}} = 1,13 \text{ m}$$

El túnel de presión tiene una longitud de 8750 m con un diámetro interno de 5,6 m cuando se trata de excavación convencional, este tramo se encuentra diseñado de tal manera que para el

aprovechamiento Toachi-Alluriquín el caudal máximo sea de 100 m³/s y su caudal mínimo será de 15 m³/s.

$$hf = \frac{100^2 * 0,013^2 * 8750 * (\pi * 5,6)^{4/3}}{\left(\pi * \frac{5,6^2}{4}\right)^{\frac{10}{3}}} = 15,56 \text{ m}$$

La chimenea de equilibrio superior consta de dos secciones, la garganta que tiene un diámetro interno de 3,5 m y una altura de 126 m; y la parte superior tiene un diámetro interno de 15 m con pérdidas casi nulas.

$$hf = \frac{100^2 * 0,013^2 * 126 * (\pi * 3,5)^{4/3}}{\left(\pi * \frac{3,5^2}{4}\right)^{\frac{10}{3}}} = 2,75 \text{ m}$$

La tubería de presión es de acero por lo cual su coeficiente de Manning es 0,012 y tiene un diámetro interno de 4,7 m y una longitud de 306 m.

$$hf = \frac{100^2 * 0,012^2 * 306 * (\pi * 4,7)^{4/3}}{\left(\pi * \frac{4,7^2}{4}\right)^{\frac{10}{3}}} = 1,18 \text{ m}$$

La chimenea inferior es una cámara de oscilación revestida de hormigón de 40 m x 10m y no genera pérdida como se observó en el tramo anterior.

1.2.3.2. Valor del coeficiente K para el aprovechamiento Toachi-Alluriquín

Este tramo entrega su máxima potencia, cuando el nivel de ingreso se encuentra a 970 msnm y el nivel de descarga a 738 msnm, con un caudal de 100 m³/s.

La sumatoria de pérdidas por fricción da un total de 18,18 m, por lo tanto el valor de K es:

$$K = \frac{20,62}{100^2} = 0,0021$$

CAPÍTULO 2: BASE CONCEPTUAL

2.1. Programación Dinámica

A la operación de un embalse se la puede definir como una serie de procesos consecutivos durante un determinado periodo de tiempo, donde un proceso define al siguiente y así sucesivamente. De esta manera, para la operación de un embalse siempre se procura que la operación que se va a planificar sea para un tiempo relativamente corto, al cual se lo puede dividir en varios tiempos menores. Entonces el problema para la operación de un embalse radica en el despacho de agua que se debe realizar en estos tiempos menores con el fin de obtener una optimización de alguna variable que depende del despacho del agua, por ejemplo que la energía entregada sea máxima. Podemos concluir que la variable que se desee maximizar depende de la cantidad despachada y la cantidad almacenada de agua.

Partimos definiendo un período de tiempo cualquiera al que llamaremos t , podemos por lo tanto decir que al inicio de este período que hemos llamado t existe una cantidad de agua de reserva almacenada a la que llamaremos S_t . Durante este periodo t los afluentes aportaran cantidades variables de agua al embalse, a esta agua que ingresa la llamaremos q_t . En este momento debemos considerar que el embalse tiene un objetivo a cumplir y por el cual entregará una cantidad de agua, a esta agua que sale del embalse la llamaremos X_t . Se podrían considerar más variables como el agua que se infiltra o el agua que se llega a evaporar, pero para presentar de una manera más fácil el trabajo, estas no se tomarán en cuenta.

Tenemos inicialmente S_t que representa el valor de agua almacenada al principio de un período t , a este lo transformaremos en el nuevo valor S_{t+1} , este nuevo valor pasará entonces a representar el valor de agua almacenada al final de un período t y este valor por lo tanto representará el valor del agua almacenada en el siguiente período t . Estas condiciones se

pueden representar algebraicamente de la siguiente manera, donde F_N es la representación de la función objetivo en todo el horizonte de operación para N períodos de tiempo:

Ec. 2.

$$\text{Maximizar } \{F_N\}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

a) Restricciones de balance de masas:

Ec. 2.

$$S_{t+1} = S_t + q_t - X_t \quad \forall t$$

b) Restricción de máxima descarga posible:

Ec. 2.

$$X_t \leq S_t + q_t - S_{MIN} \quad \forall t$$

c) Restricción de almacenamiento:

Ec. 2.

$$S_{MIN} \leq S_t \leq S_{MAX} \quad \forall t$$

d) Restricción de descarga:

Ec. 2.

$$0 \leq X_{MIN} \leq X_t \leq X_{MAX} \quad \forall t$$

Donde:

S_{MIN} y S_{MAX} = almacenamientos mínimos y máximos permitidos

X_{MIN} y X_{MAX} = descargas mínima y máxima permitidas

La programación dinámica tiene dos acercamientos de acuerdo a las variables que se tengan. La primera aproximación nos permite llegar a un valor final deseado conociendo las variables iniciales, en base a estas variables iniciales se toman decisiones posteriores que permitirán que el proceso sea optimizado, ya que el valor final será el máximo o el mínimo según se plantee. La segunda aproximación sucede cuando no se conocen las variables iniciales pero se conoce el resultado final, esta aproximación nos permite ir desde el final hacia el inicio para determinar valores óptimos para las variables de decisión.

En el caso de esta disertación se utilizará la primera aproximación, debido a que se cuenta con los registros anuales de los caudales de los ríos Toachi y Pilatón y con las herramientas necesarias para saber cómo serán manejados los caudales dentro del proyecto. Es decir, se tienen las variables de decisión iniciales y con estos se realizará la optimización del proyecto utilizando programación dinámica determinística discreta.

2.1.1. Programación Dinámica Determinística Discreta

Se plantea el problema para la última etapa, dentro del contexto de operación de un embalse se lo puede representar como se muestra a continuación:

Ec. 2.

$$f_N(S_N) = \text{Min (o Max)} \{R_N(S_N, X_N)\}$$

Donde:

S_N = valor almacenado de agua inicial para un tiempo cualquiera N

$R_N(S_N, X_N)$ = función de retorno que mide la contribución de cada período de tiempo a la función objetivo general

En este caso el objetivo al que se desea llegar, es a definir para el último período de tiempo y para los volúmenes variables almacenados de agua en el embalse al inicio del período, cuál será el valor de volumen de agua óptimo almacenado al final de cada periodo. Por lo tanto procederemos a calcular el valor de agua que deberá entregar el embalse en base al valor de agua almacenada al inicio de un período, y escogeremos como la solución más eficiente aquella que produzca los mejores resultados para el último período de tiempo. Y a este proceso que se lleva a cabo lo podemos representar de la siguiente manera:

1. Discretizar el volumen inicial S_N y el final S_{N+1} , para la última etapa o sea, se definen $S_N(i)$ y $S_{N+1}(i)$, $i=1, 2, \dots, M$, en donde $S_N(i)$ es el valor discreto i para el volumen inicial y $S_{N+1}(i)$, es el valor discreto i para el volumen final, y M es el número de valores discretos.

2. Para cada $S_N(i)$ y para cada S_{N+1} se calcula la descarga $X_N(i, j)$ correspondiente usando la ecuación de transformación, es decir:

Para cada $S_N(i)$, $i=1, \dots, M$

Se calcula:

Ec. 2.

$$X_N(i, j) = S_N(i) + q_N - S_{N+1}(j), j = 1, \dots, M$$

en donde $X_N(i, j)$ es la descarga correspondiente a un volumen inicial $S_N(i)$ y a un volumen final $S_{N+1}(j)$.

3. Para cada $S_N(i)$ se escoge $S_{N+1}(j)$ de tal forma que:

Ec. 2.

$$X_N(i, j) = S_N(i) + q_N - S_{N+1}(j)$$

produzca el mínimo déficit. Estos valores de $S_{N+1}(j)$ y de $X_N(i, j)$ se designan como $S_{N+1}^*(i)$ y $X_N^*(i)$.

4. Se almacenan o se guardan los valores de $S_{N+1}^*(i)$ para cada valor discreto de $S_N(i)$, $i=1, \dots, M$.

Cuando se haya logrado resolver el problema planteado para la etapa N podemos continuar resolviendo para las siguientes etapas. Es decir que lo que buscamos es definir los valores óptimos de las variables de decisión, para lograr maximizar o minimizar la función de retorno de las últimas etapas ($R_{N-1} + R_N$). De esta forma se continúa para las siguientes etapas, y se halla la solución del problema.

2.1.2. Programación Dinámica Determinística Continua

Ahora se presenta la aproximación matemática que representa esta forma de programación dinámica, dentro del marco de la operación de embalses. Este método es distinto al anterior debido a que principalmente la programación dinámica determinística discreta depende de iteraciones para encontrar un resultado, mientras que la programación dinámica determinística continua basa sus resultados en ecuaciones matemáticas cuadráticas que si bien se conoce pueden darnos máximos y mínimos según sea el caso del objetivo que se plantee.

En este caso lo que se tiene es una ecuación de transformación lineal y una función de retorno cuadrática, puesto que como se mencionó anteriormente al tener una ecuación cuadrática, esta nos puede entregar máximos o mínimos globales según el objetivo que nos hayamos trazado al inicio. Además, en el caso de operación de embalses la ecuación de transformación siempre es lineal, como se presenta a continuación:

Ec. 2.

$$S_{t+1} = S_t - X_t + a_t$$

Donde:

a_t = término constante que incluye aportes y pérdidas en el embalse, en un período t

Por otra parte, en cambio tenemos que las funciones de retorno no suelen presentarse de forma cuadrática generalmente, pero para presentar el caso como primera aproximación se asumirá

que serán cuadráticas. Dentro de la operación de embalses, si existen funciones de retorno cuadráticas de uso común como lo son las que se presentan a continuación:

Ec. 2.

$$R_t(X_t, S_t) = (D_t - X_t)^2$$

Donde:

$(D_t - X_t)^2$ = cuadrado de los déficits

y

Ec. 2.

$$R_t(X_t - S_t) = (D_t - X_t)^2 + (G_t - S_t)^2$$

Donde:

$(D_t - X_t)^2 + (G_t - S_t)^2$ = el cuadrado de los déficits más el cuadrado de la diferencia de los almacenamientos

D_t = cantidad de agua deseada en el embalse

G_t = cantidad de agua deseada que se almacene en el embalse

2.1.3. Programación Dinámica Estocástica Implícita (Método de Monte Carlo)

Este método consta de tres pasos:

- 1. Generación de flujo de entrada al embalse*
- 2. Programación Dinámica determinística sobre flujos generados*
- 3. Análisis de Regresiones Múltiples para determinar la regla de operación del embalse.*

El primer paso es la generación de flujos de entrada al embalse, que puede descomponerse en cuatro partes.

1. Identificación del Modelo de generación

2. Estimación del Modelo de generación

3. Chequeo del Modelo de generación

4. Generación de las series sintéticas

El segundo es el uso de programación dinámica determinística sobre flujos generados para varias trazas de caudales. Cada traza se puede representar con la siguiente ecuación que está sujeta a tres restricciones:

Ec. 2.

$$\text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^T (D_t - X_t^1) \right\}$$

1. Balance de Masas

Ec. 2.

$$S_{t+1}^1 = S_t^1 + q_t^1 - X_t^1 - \text{Otras pérdidas } \forall t$$

2. Límites de Almacenamiento

Ec. 2.

$$S_{MIN} \leq S_t^1 \leq S_{MAX}$$

3. Límites en las Descargas

Ec. 2.

$$X_{MIN} \leq X_t^1 \leq X_{MAX}$$

Donde:

D_t = demanda por agua durante el período de tiempo t

I = indicativo de la traza.

q_t^1 = flujos de entrada al embalse durante el tiempo t

X_t^1 = descargas del embalse durante el tiempo t

T = horizonte de operación

El problema entonces ha de ser resuelto para cada traza 1 de todas las trazas que se hayan generado. La ecuación recursiva de este algoritmo mediante programación dinámica puede entonces representarse como sigue:

Ec. 2.

$$f_t(S_t^1, X_t^1) = \text{Min}\{(D_t - X_t^1)^2 + f_{t+1}(S_{t+1}^1, X_{t+1}^1)\}$$

Esta ecuación entonces se debe resolver para cada una de las etapas comenzando desde la última hacia la primera en forma recursiva, de tal manera que nos entregará una solución al problema de optimización propuesto.

El tercer paso es el análisis de regresiones múltiples para determinar la regla de operación del embalse. Que comprende un modelo del almacenamiento del embalse en periodos anteriores, de la cantidad de agua que entrega en periodos anteriores y de la cantidad de agua que ingresa al embalse en dicho periodo y anteriores períodos. Algebraicamente podemos expresarlo de la siguiente manera:

Ec. 2.

$$X_t = g(S_t, S_{t+1}, \dots, S_{t-p}, X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-2}, q_t, q_{t-1}, \dots, q_{t-r})$$

Dada la información obtenida sobre la optimización gracias a las trazas que se generaron y las correlaciones entre las variables independientes con la variable dependiente X_t .

2.1.4. Programación Dinámica Estocástica Explícita (Método de Cadenas de Markov)

Este modelo de programación dinámica es un método estadístico en base al agua que ingresa al embalse y comprende el desarrollo de modelos probabilísticos. Para este caso el valor q_t representa los caudales de entrada al embalse los cuales son aleatorios y cuya distribución de probabilidades, es conocida. Además tenemos S_t que representa los almacenamientos en el embalse al inicio del período de tiempo. Por lo tanto podemos representar a las descargas en función de la ecuación de balance de masas, lo que nos resulta como sigue:

Ec. 2.

$$X_{kilt} = S_{kt} + q_{it} - e_{klt} - S_{lt+1}$$

Donde:

X_{kilt} = ecuación del balance de masas

S_{kt} = división de posibles valores discretos de S_t

q_{it} = división en valores discretos de los flujos de entrada al embalse

S_{lt+1} = volumen final en el período de tiempo t

e_{klt} = la evaporación durante el período t y es función de los almacenamientos iniciales y finales

Cuando se considera que los flujos de entrada son aleatorios independientes pueden considerarse los casos cíclico y no cíclico. En el caso de que sea un caso cíclico quiere decir que las probabilidades de transición se repetirán después de cierto tiempo y para el caso de que sea no cíclico las probabilidades de transición siempre serán diferentes.

La solución mediante el uso de la programación dinámica define para el estado estable el almacenamiento final óptimo en el embalse S_{it+1} para cada volumen inicial S_{kt} y flujos de entrada q_{it} en cada período de tiempo t .

En resumen tenemos cuatro métodos de programación dinámica, dos corresponden a métodos determinísticos y los otros dos restantes corresponden a métodos estocásticos. A los métodos determinísticos los podemos definir como aquellos donde se conocen las variables iniciales, y en su programación dinámica se toman decisiones subsecuentes con el fin de maximizar determinada variable. En esta disertación la variable que se desea maximizar y que se va a optimizar es la potencia entregada; para esto se utilizó programación dinámica determinística discreta. Para métodos estocásticos en cambio proponemos los resultados que deseamos obtener al final y mediante regresiones obtenemos el valor óptimo de las variables iniciales.

2.2. Escenarios Hidrológicos

2.2.1. Año seco

Se puede establecer de acuerdo a los registros históricos de los caudales de los ríos Pilatón y Toachi que se tienen, que si tomamos por ejemplo todos los primeros de enero y tomamos el menor valor, tendremos el mínimo caudal registrado para el primero de enero y al repetir este proceso para los 365 días del año, tendremos el año más seco registrado. Es decir que existe

una probabilidad muy baja de que el caudal para un día aún sin registrar baje de este límite, esto se ejemplifica en los anexos 1 y 2.

Los anexos 1 y 2, muestran los valores más bajos de caudal registrado para ese día del año, tanto como para el río Pilatón como para el río Toachi.

2.2.2. Año lluvioso

Se puede establecer de acuerdo a los registros históricos de los caudales de los ríos Pilatón y Toachi que se tienen, que si tomamos por ejemplo todos los primeros de enero y tomamos el mayor valor, tendremos el máximo caudal registrado para el primero de enero y al repetir este proceso para los 365 días del año, tendremos el año más lluvioso registrado. Es decir que existe una probabilidad muy baja de que el caudal para un día aún sin registrar exceda este límite, esto se muestra en los anexos 3 y 4.

Los anexos 3 y 4, muestran los valores más altos de caudal registrado para ese día del año, tanto como para el río Pilatón como para el río Toachi.

2.2.3. Año medio

Al calcular la media utilizando todas las series históricas que se tengan, se obtendrá una serie de valores medios. Podemos decir que este es el valor que más probablemente puede ocurrir en el futuro, representado en los anexos 5 y 6.

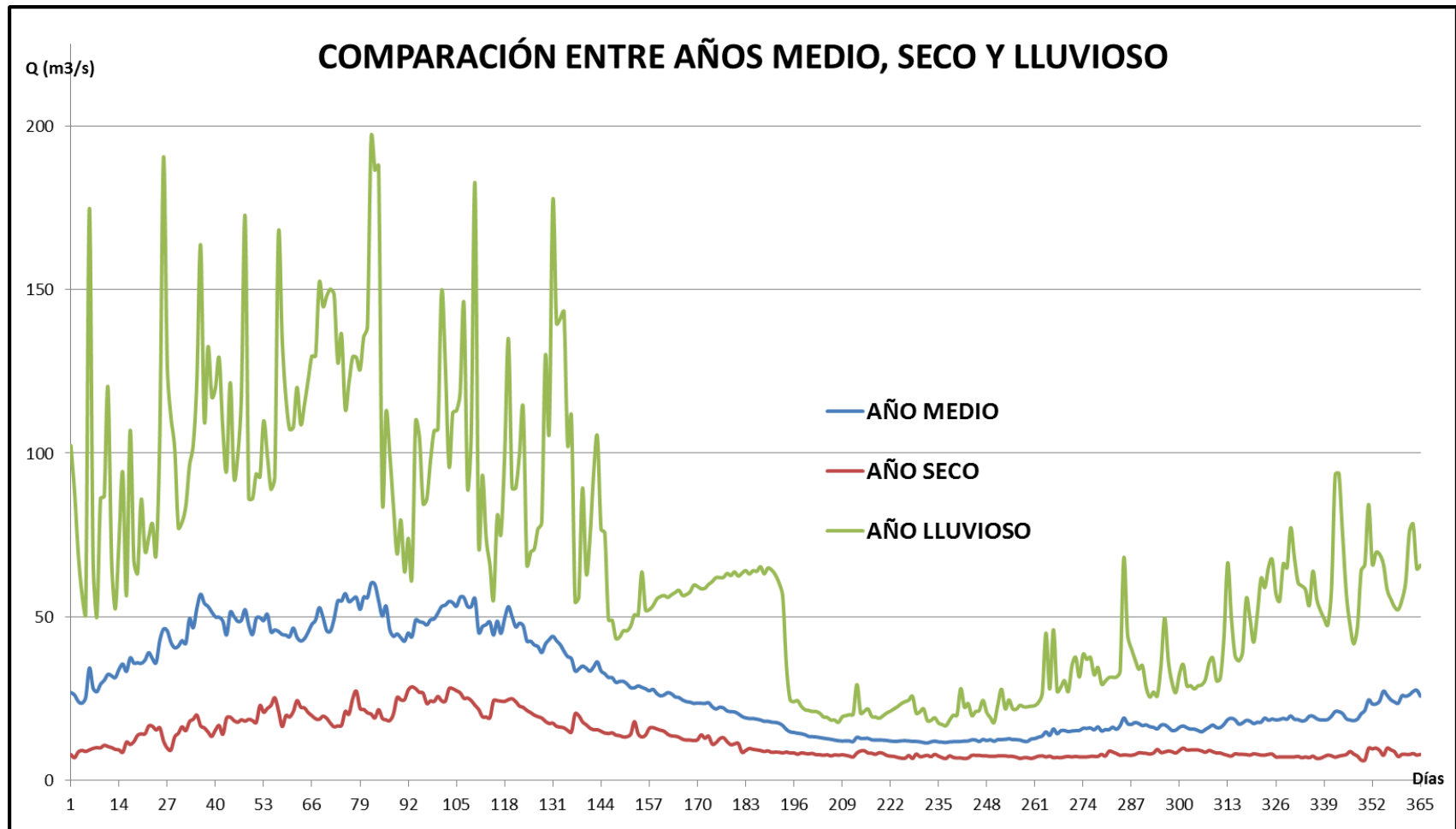
Los anexos 5 y 6, muestran los valores medios de caudal calculados para ese día del año, tanto como para el río Pilatón como para el río Toachi.

2.2.4. Comparación entre años seco, lluvioso y medio

En el gráfico 1 tenemos la comparación entre años medio, seco y lluvioso para el río Pilatón. La serie del año seco se encuentra representada en color rojo y nos indica que los valores futuros de caudal tendrán una probabilidad muy baja de bajar de este límite, para ese día del año. La serie del año lluvioso se encuentra marcada con el color verde e indica que los valores futuros de caudal tendrán muy baja probabilidad de superar este límite, en ese día del año. Además, la serie del año medio de color azul, nos indica que ese es valor más probable para caudales futuros en ese día del año. Todo este análisis fue realizado para el río Pilatón con los datos de 22 series históricas.

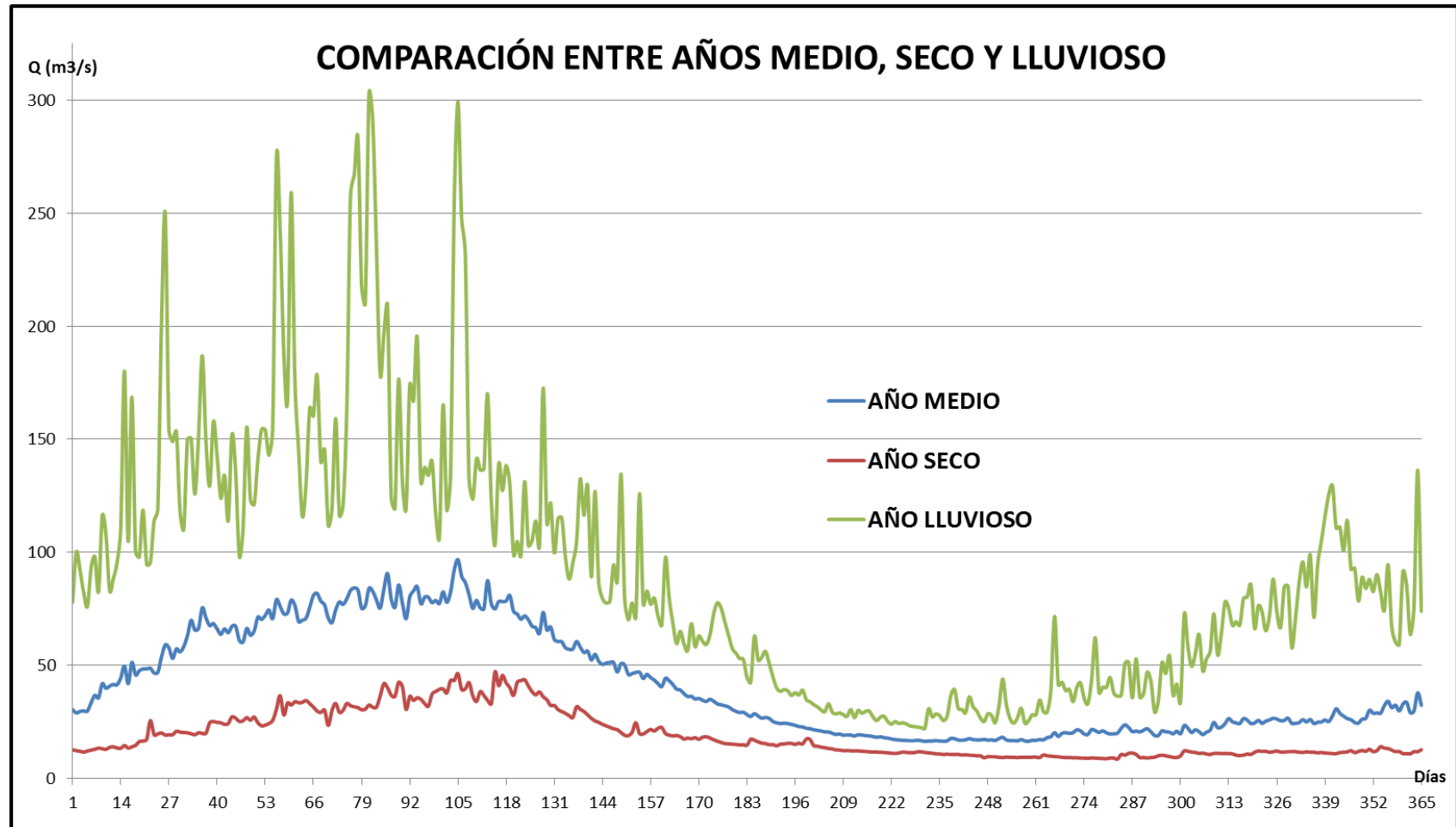
El anterior análisis también fue realizado para el río Toachi con los datos de 22 series históricas. Y lo podemos apreciar en el gráfico 2.

Gráfico : Comparación del río Pilatón



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Gráfico : Comparación del río Toachi



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

CAPÍTULO 3: OPTIMIZACIÓN DE CAUDALES MEDIANTE PROGRAMACIÓN DINÁMICA

3.1. Recopilación y restricciones

En el capítulo 1.2 se calculó y determinó el factor K, la importancia para este capítulo reside en que las pérdidas son variables, ya que dependen de un caudal variable. Además se definieron límites de nivel entre los cuales el agua es captada y descargada, con el fin de medir la altura neta.

Para el caso del tramo Pilatón–Sarapullo se estableció que el factor K tiene un valor de 0,0092 y para el tramo Toachi–Alluriquín se estableció un factor K con un valor de 0,0021.

3.1.1. Restricciones del tramo Pilatón-Sarapullo

Este tramo consta de una toma lateral, el nivel de cota máximo se encuentre entre 1105, 0 msnm y 1103, 8 msnm. El caudal de operación es máximo 40 m³/s y mínimo 6 m³/s, previamente se considera un caudal ecológico de 2,85 m³/s. La ecuación que relaciona las cotas de acuerdo al caudal se presenta a continuación.

Ec. 3.

$$y = \frac{(1103,8 - 1105)}{(6 - 40)} * (x - 6) + 1103,8$$

Donde:

y = cota de entrada del agua

x = caudal de operación

La descarga de este tramo, es el inicio del siguiente tramo. Por lo tanto en la siguiente sección corresponde también a la ecuación para el nivel de descarga de este tramo.

3.1.2. Restricciones del tramo Toachi-Alluriquín

Este tramo consta de una presa que permite regular el caudal que ingresa, la cual opera normalmente entre 970,0 msnm y 965 msnm. El embalse tiene una capacidad total de 8 Hm³ que corresponde a un caudal de 640 m³/s, sin embargo normalmente opera con 2 Hm³ con un caudal máximo de 100 m³/s y un caudal mínimo de 15 m³/s, previamente se debe considerar un caudal ecológico.

El caudal ecológico es la cantidad de agua que se necesita con el fin de conservar los valores ecológicos en su cauce, como lo son: flora y fauna, dilución de polutantes o contaminantes, amortiguación de los extremos climatológicos e hidrológicos y paisaje. Para Ecuador el CONELEC recomienda un valor equivalente al 10% del caudal medio. Por lo tanto, en este tramo se considera un caudal ecológico de 4,14 m³/s. La ecuación que relaciona las cotas de acuerdo al caudal se presenta a continuación:

Ec. 3.

$$y = \frac{(965 - 970)}{(15 - 100)} * (x - 15) + 965$$

La descarga de este tramo viene dado por una chimenea de equilibrio, la cual permite que el nivel del agua oscile entre 738,0 msnm y 753,0 msnm de acuerdo al caudal con el que se haya operado. A continuación se presenta la ecuación que relaciona la cota de descarga con el caudal:

Ec. 3.

$$y = \frac{(738 - 753)}{(15 - 100)} * (x - 15) + 738$$

3.2. Optimización de los Caudales de la Captación y del Embalse Toachi

Para realizar la optimización se contó con registros históricos de los caudales medios diarios de los ríos Toachi y Pilatón, de esta forma se logró obtener la programación dinámica determinística discreta para 22 series históricas.

Al realizar el proceso de optimización se manejó una gran cantidad de datos, la herramienta Microsoft Excel facilitó el procesamiento de estos para evitar cometer errores. Cabe mencionar que todos los métodos de programación dinámica son bastante sensibles en sus resultados si tan solo una variable se altera, por lo tanto al utilizar Microsoft Excel minimizamos la posible alteración de una variable.

Para la optimización se utilizó la herramienta Solver del programa Microsoft Excel, dado que es un proceso iterativo y esta herramienta permite realizarlo, al cambiar los valores de determinadas celdas sujetas a determinadas restricciones con el fin de optimizar una celda específica.

A continuación se presenta y se detalla por pasos el proceso realizado en Microsoft Excel para la primera serie histórica y se detalla en el numeral 3.3:

Tabla : Proceso de optimización

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC		
1																															
2			PILATÓN								TOACHI																				
3			Qrío	Qútil	Qturbinable			H			Qrío	Qútil	Q p+t	Q 100	Reser	Solver	H														
4					Verif 1	Verif 2								Parcial				Qtur													
5			m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	msnm				m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	msnm													
6	1	36,62	33,77	33,77	33,77	33,77	1104,78		1	43,93	39,79	73,56	73,56	73,56	0,00	0,00	73,56	968,44	125,84	208,75	38,00	137,29	175,28	E		0,00	0,00				
7	2	29,45	26,60	26,60	26,60	26,60	1104,53		2	46,33	42,19	68,79	68,79	68,79	0,00	0,00	68,79	968,16	129,85	210,73	30,88	129,62	160,50	F		0,00	0,00				
8	3	22,14	19,29	19,29	19,29	19,29	1104,27		3	42,09	37,95	57,24	57,24	57,24	0,00	0,00	57,24	967,48	133,36	215,15	23,00	110,10	133,11	M		0,00	0,00				
9	4	39,63	36,78	36,78	36,78	36,78	1104,89		4	81,63	77,49	114,27	100,00	14,27	0,00	0,00	100,00	970,00	122,44	196,00	40,26	175,24	215,50	A		0,00	0,00				
10	5	24,30	21,45	21,45	21,45	21,45	1104,35		5	50,45	46,31	67,76	67,76	67,76	0,00	0,00	67,76	968,10	132,01	211,15	25,32	127,93	153,25	M		0,00	0,00				
11	6	20,91	18,06	18,06	18,06	18,06	1104,23		6	38,58	34,44	52,51	52,51	52,51	0,00	0,00	52,51	967,21	134,02	216,80	21,64	101,77	123,42	J		0,00	0,00				
12	7	15,06	12,21	12,21	12,21	12,21	1104,02		7	25,37	21,23	33,44	33,44	33,44	0,00	0,00	33,44	966,08	136,56	222,48	14,91	66,53	81,44	J		0,00	0,00				
13	8	11,76	8,91	8,91	8,91	8,91	1103,90		8	19,72	15,58	24,48	24,48	24,48	0,00	7,34	31,83	965,99	137,18	222,89	10,93	63,43	74,35	A	51,46	240,18					
14	9	11,98	9,13	9,13	9,13	9,13	1103,91		9	19,90	15,76	24,88	24,88	24,88	0,00	6,93	31,81	965,99	137,16	222,90	11,19	63,39	74,58	S	48,54	226,53					
15	10	16,03	13,18	13,18	13,18	13,18	1104,05		10	25,38	21,24	34,42	34,42	34,42	0,00	0,00	34,42	966,14	136,31	222,23	16,06	68,38	84,45	O	0,00	0,00					
16	11	18,75	15,90	15,90	15,90	15,90	1104,15		11	27,28	23,14	39,04	39,04	39,04	0,00	0,00	39,04	966,41	135,41	220,97	19,25	77,14	96,39	N	0,00	0,00					
17	12	18,64	15,79	15,79	15,79	15,79	1104,15		12	24,07	19,93	35,73	35,73	35,73	0,00	0,00	35,73	966,22	135,63	221,88	19,15	70,88	90,03	D	0,00	0,00					
18												626,13			14,27	14,27	626,13					1462,30				466,71					
19																															

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

3.3. Proceso de Optimización Utilizando la Herramienta Solver

1. Se parte del registro de los caudales medios diarios de la serie en estudio, correspondientes a los ríos Pilatón y Toachi. Al ser 365 días, se simplifica los datos con sus medias mensuales para poder manejarlos de una manera más eficiente. Columnas C y J.
2. A partir de aquí se establece que al caudal del río se le debe restar el caudal ecológico, de esta manera se obtiene el caudal útil. Columnas D y K.
3. Se realizan las verificaciones correspondientes, para que el caudal turbinable cumpla con el rango de caudales para el cual el tramo puede operar. Columnas E y F.
4. De acuerdo a la variación del caudal se establece con las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, el nivel superior libre de agua en msnm para el tramo Pilatón-Sarapullo. Columna G.
5. Se establece que el caudal turbinable del tramo Toachi-Alluriquín es igual a la suma del caudal turbinado del tramo Pilatón-Sarapullo y el caudal útil del río Toachi, columna L. La celda L18 representa la sumatoria.
6. En el tramo Toachi-Alluriquín se encuentra la presa Toachi, capaz de almacenar el caudal excedente del tramo. Su máxima capacidad de operación es $100 \text{ m}^3/\text{s}$ y el excedente se puede almacenar. Columnas M y N.

7. El año al tener épocas secas y lluviosas, nos permite almacenar agua durante sus épocas lluviosas para utilizarla durante las épocas secas y así evitar cortes de energía. Al tener una reserva parcial se hace necesario el uso de la programación dinámica para determinar en qué fechas se debe surtir el agua almacenada con el fin de obtener la mayor cantidad posible de energía en el año sin dejar de operar.

7.1. Se obtiene las reservas parciales, teniendo en cuenta que la serie debe progresar hacia el futuro. Columna N. La celda N18 indica la sumatoria.

7.2. Se redistribuye el caudal con el fin de maximizar la energía total del año utilizando Solver.

a. El solver lo que hace es cambiar los valores en determinadas celdas, en este caso desde O10 hasta O17 se convierten en celdas variables ya que solo se pueden cambiar valores futuros.

b. La celda X18 que representa a la sumatoria de potencia entregada total se convierte en la celda objetivo, el Solver nos entregará el valor máximo que encuentre al cambiar los valores de las celdas variables.

c. Se establecen como restricciones que las celdas desde P6 hasta P17 no pueden ser mayores a $100 \text{ m}^3/\text{s}$, ni menores a $15 \text{ m}^3/\text{s}$.

d. Se establece como restricción que la celda O18 que es la sumatoria de las celdas variables sea igual a la sumatoria de las reservas parciales.

e. Se ejecuta y comprueba que la celda P18 que es la sumatoria de los caudales turbinables, sea igual a la celda L18. Esto nos indica que las reservas parciales han sido distribuidas correctamente.

Cuadro : Redistribución anual de caudales utilizando Solver

Parámetros de Solver

Establecer objetivo:

Para: ☒ Máx. ☐ Mín ☐ Valor de:

Cambiando las celdas de variables:

Sujeto a las restricciones:

☒ Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Ayuda Resolver Cerrar

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

8. De acuerdo a la variación del caudal se establece con las ecuaciones antes presentadas, el nivel superior libre de agua en msnm para el tramo Toachi-Alluriquín. Columna Q.

9. Al tener alturas brutas que son variables en función de los caudales y las pérdidas dadas por el cociente entre el coeficiente K y el caudal, podemos obtener fácilmente las alturas netas para cada tramo. Columnas S y T.

10. Teniendo altura neta podemos calcular las potencias entregadas en cada tramo. Columnas V y W. Además de la suma entre ambos tramos, columna X. Y la celda X18 representa la sumatoria de las sumas de las potencias entregadas.

11. Al final del proceso iterativo llevado a cabo por Solver, en base a esta muestra podemos ver que el caudal de $14,27 \text{ m}^3/\text{s}$ representa el 100% de la reserva. Y que para obtener la mayor potencia entregada posible la distribuyó en los meses de agosto y septiembre. De esta forma, entregó un 51,46% de la reserva a agosto y 48,54% de la reserva a septiembre. Columnas AA y AB.

12. El anterior proceso se llevó a cabo con las medias mensuales, y para optimizar dichos meses en el caso de este ejemplo partimos de que la reserva acumulada anual es de $466,71 \text{ m}^3/\text{s}$. Y que se repartirán el 51,46% y el 48,54% del total en sus respectivos meses. En agosto el 51,46% es igual a $240,18 \text{ m}^3/\text{s}$ y se lo redistribuye con la herramienta Solver y se realiza el mismo proceso para el mes de septiembre.

Cuadro : Redistribución mensual de caudales utilizando Solver para agosto.

Parámetros de Solver

Establecer objetivo:

Para: ☒ Máx. ☐ Mín ☐ Valor de:

Cambiando las celdas de variables:

Sujeto a las restricciones:

☒ Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A

Tabla : Optimización de los caudales del mes de agosto

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
19																													
20			PILATÓN							TOACHI																			
21			Qrío	Qútil	Qturbinable		H			Qrío	Qútil	Q p+t	Q 100	Reser	Solver					H neta									
22				Verif 1	Verif 2									Parcial	Qtur	H			Pilatón	Toachi									
23			m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	msnm			m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	msnm		m	m			MW	MW	Final				
239	216	11,19	8,34	8,34	8,34	1103,88		216	19,30	15,16	23,50	23,50	0,00	8,35	31,85	965,99		137,25	222,89			10,23	63,47	73,70	AGOSTO				
240	217	10,79	7,94	7,94	7,94	1103,87		217	18,78	14,64	22,58	22,58	0,00	9,30	31,88	965,99		137,30	222,88			9,75	63,54	73,28					
241	218	11,03	8,18	8,18	8,18	1103,88		218	18,08	13,94	22,12	22,12	0,00	9,67	31,79	965,99		137,27	222,90			10,04	63,36	73,40					
242	219	11,03	8,18	8,18	8,18	1103,88		219	17,91	13,77	21,95	21,95	0,00	9,83	31,78	965,99		137,27	222,90			10,04	63,34	73,38					
243	220	11,27	8,42	8,42	8,42	1103,89		220	17,91	13,77	22,19	22,19	0,00	9,56	31,74	965,98		137,25	222,91			10,33	63,26	73,59					
244	221	11,27	8,42	8,42	8,42	1103,89		221	17,56	13,42	21,84	21,84	0,00	9,88	31,72	965,98		137,25	222,92			10,33	63,22	73,54					
245	222	10,95	8,10	8,10	8,10	1103,87		222	17,56	13,42	21,52	21,52	0,00	10,25	31,77	965,99		137,28	222,91			9,94	63,32	73,26					
246	223	10,79	7,94	7,94	7,94	1103,87		223	17,39	13,25	21,19	21,19	0,00	10,60	31,78	965,99		137,30	222,90			9,75	63,34	73,09					
247	224	10,16	7,31	7,31	7,31	1103,85		224	16,87	12,73	20,03	20,03	0,00	11,83	31,86	965,99		137,36	222,89			8,97	63,49	72,46					
248	225	10,16	7,31	7,31	7,31	1103,85		225	16,95	12,81	20,12	20,12	0,00	11,74	31,86	965,99		137,36	222,89			8,97	63,48	72,45					
249	226	9,92	7,07	7,07	7,07	1103,84		226	17,47	13,33	20,40	20,40	0,00	11,53	31,94	966,00		137,38	222,87			8,68	63,63	72,32					
250	227	10,00	7,15	7,15	7,15	1103,84		227	17,47	13,33	20,48	20,48	0,00	11,44	31,92	966,00		137,38	222,87			8,78	63,61	72,39					
251	228	10,55	7,70	7,70	7,70	1103,86		228	20,34	16,20	23,91	23,91	0,00	8,12	32,03	966,00		137,31	222,84			9,46	63,81	73,26					
252	229	10,95	8,10	8,10	8,10	1103,87		229	19,65	15,51	23,61	23,61	0,00	8,31	31,91	965,99		137,28	222,87			9,94	63,59	73,53					
253	230	11,50	8,65	8,65	8,65	1103,89		230	17,39	13,25	21,90	21,90	0,00	9,76	31,66	965,98		137,22	222,93			10,62	63,11	73,73					
254	231	10,55	7,70	7,70	7,70	1103,86		231	17,56	13,42	21,12	21,12	0,00	10,71	31,84	965,99		137,32	222,89			9,46	63,44	72,90					
255	232	10,16	7,31	7,31	7,31	1103,85		232	17,21	13,07	20,38	20,38	0,00	11,50	31,88	965,99		137,36	222,88			8,97	63,52	72,49					
256	233	10,39	7,54	7,54	7,54	1103,85		233	17,13	12,99	20,53	20,53	0,00	11,30	31,83	965,99		137,34	222,89			9,26	63,43	72,69					
257	234	11,58	8,73	8,73	8,73	1103,90		234	18,00	13,86	22,59	22,59	0,00	9,10	31,69	965,98		137,21	222,93			10,71	63,17	73,89					
258	235	15,87	13,02	13,02	13,02	1104,05		235	16,87	12,73	25,74	25,74	0,00	5,13	30,87	965,93		136,55	223,13			15,89	61,59	77,49					
259	236	13,81	10,96	10,96	10,96	1103,97		236	21,21	17,07	28,03	28,03	0,00	3,45	31,48	965,97		136,90	222,98			13,41	62,76	76,16					
260	237	12,69	9,84	9,84	9,84	1103,94		237	19,04	14,90	24,74	24,74	0,00	6,83	31,57	965,97		137,07	222,96			12,06	62,93	75,00					
261	238	14,60	11,75	11,75	11,75	1104,00		238	36,60	32,46	44,21	44,21	0,00	0,00	44,21	966,72		136,01	219,46			14,29	86,75	101,03					
262	239	15,87	13,02	13,02	13,02	1104,05		239	25,56	21,42	34,44	34,44	0,00	0,00	34,44	966,14		136,35	222,22			15,87	68,42	84,29					
263	240	14,36	11,51	11,51	11,51	1103,99		240	23,21	19,07	30,58	30,58	0,00	0,86	31,44	965,97		136,81	222,99			14,08	62,68	76,76					
264	241	12,54	9,69	9,69	9,69	1103,93		241	20,87	16,73	26,41	26,41	0,00	5,29	31,70	965,98		137,08	222,92			11,87	63,18	75,05					
265	242	12,85	10,00	10,00	10,00	1103,94		242	22,43	18,29	28,29	28,29	0,00	3,42	31,71	965,98		137,04	222,92			12,26	63,20	75,46					
266	243	13,17	10,32	10,32	10,32	1103,95		243	25,56	21,42	31,74	31,74	0,00	0,00	31,74	965,98		136,99	222,91			12,64	63,26	75,90		240,18	240,18		

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

13. Al final podemos verificar que el resultado sea el correcto al comparar las celdas N389 y O389 porque la una representa la sumatoria de caudales de reserva parciales, y la otra representa la sumatoria de los caudales parciales redistribuidos.

Tabla : Resultado del año de la primera serie optimizado

	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
19																	
20	TOACHI																
21	Qrio	Qútil	Qp+tt	Q 100	Reser	Solver		H	H neta		Pe						
22					Parcial	Qtur			Pilatón	Toachi	Pilatón	Toachi	Final				
23	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	msnm	m	m	MW	MW	MW				
389			18891,95		466,71	466,71	18891,95								43873,45		
390																	

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

14. La celda L389 representa el caudal total disponible de la suma del caudal turbinado en el tramo Pilatón-Sarapullo y el caudal útil del río Toachi, sin aún considerar límites. Y la celda P389 representa la suma de los caudales turbinados ajustados a los límites, una vez que se redistribuyó los caudales parciales para lograr la optimización. Al ser el mismo valor, significa que se realizó correctamente la optimización.

15. La celda N389 representa la sumatoria de los caudales parciales de reserva y la celda O389 representa la sumatoria de los caudales de reserva redistribuidos en donde sean necesarios para la optimización.

16. Finalmente la celda X389 indica la potencia total entregada para esta serie, de igual manera se realiza el proceso para las 21 series restantes y se obtienen los resultados que serán presentados en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

En los anexos 7-28 se presenta la potencia diaria entregada por el proyecto hidroeléctrico, la línea azul representa a la serie una vez que ha sido optimizada con los fundamentos de la programación dinámica y la línea roja representa a la serie que fue calculada inicialmente y que fue provista por HIDROTOAPI S.A.

En el anexo 7 podemos ver que las curvas son similares pero tienen pequeñas variaciones, lo que indica que el cálculo es correcto, pero que la forma en que se calculó inicialmente y que fue provisto por HIDROTOAPI S.A. fue correcta pero no fue muy detallada. Alrededor del día 250 podemos ver el funcionamiento de la programación dinámica discreta, ya que se almacenó agua en los primeros 200 días para que en época lluviosa la potencia que entrega la central hidroeléctrica no sea tan baja.

En el anexo 10 tenemos algo similar a lo que se ha explicado, pero en este caso la curva provista por HIDROTOAPI S.A. tiene varios días a partir del día 200 donde no entrega potencia, entonces al utilizar programación dinámica discreta y poder almacenar agua podemos ver que esta es utilizada eficientemente para que la central hidroeléctrica no deje de operar. Ya que se almacena agua en las épocas donde se puede y se la utiliza en las épocas donde es necesaria.

Desde el anexo 23 hasta el anexo 28 podemos ver que las curvas no son similares de ninguna forma, esto quiere decir que existió un error de cálculo en las series provistas por HIDROTOAPI S.A. En este caso, los cálculos que se realizan para llegar a la potencia entregada son bastante extensos y un pequeño cambio afecta a las demás partes. Entonces, podemos decir que al ser mayor el nivel de detalle que exige la programación dinámica determinística discreta, los errores también son menores si se realiza un buen trabajo.

En los documentos técnicos facilitados por HIDROTOAPI S.A. se tiene factor de planta de 0,85 para ambos tramos. El factor de planta es una medida de la eficiencia de la central hidroeléctrica, se la define como el cociente entre el número de horas en funcionamiento operativo de la central y el número de horas de un período de tiempo. En base a los resultados obtenidos mediante el uso de programación dinámica determinística discreta en esta disertación, se obtuvo un valor para el factor de planta aproximadamente igual a 1, un factor de planta igual a 1 significa que la central hidroeléctrica opera continuamente sin interrupciones.

El resumen del cálculo para un factor de planta de 0,85 y de 1, se muestran respectivamente en las tablas 7 y 8. Cada tabla representa la sumatoria de la energía diaria de una serie, por lo tanto se tienen 22 datos que representan la sumatoria de la energía de todos los días de cada serie. Por consecuente, podemos ver que se obtienen mejores resultados cuando el factor de planta es más alto.

Tabla : Energía de las series con $F_p=0,85$

ENERGÍA DE LAS SERIES FP 0,85																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Año
Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	U
895	1195	1180	897	709	894	1157	1180	1185	1251	1200	1318	829	977	780	784	873	1060	861	868	898	913	Sumatoria
996																						Promedio

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Tabla : Energía de las series con $F_p=1$

ENERGÍA DE LAS SERIES FP 1																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Año
Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	Kw.h	U
1053	1406	1388	1056	834	1052	1361	1388	1394	1472	1411	1551	975	1149	918	922	1028	1247	1013	1021	1056	1075	Sumatoria
1171																						Promedio

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Existen varios métodos para realizar una optimización mediante programación dinámica, la determinística parte de datos iniciales como lo son los caudales del río y la estocástica comienza en el final con datos como por ejemplo potencia esperada, realizando regresiones para determinar el valor óptimo de las variables iniciales, cabe mencionar que esto se puede resumir en un proceso iterativo para una gran cantidad de datos.

Esta disertación se llevó acabo utilizando programación dinámica determinística discreta, lo que facilitó en cierta medida el trabajo, sin embargo esto se pudo hacer ya que se contaba con los registros históricos continuos, de otro modo el número de variables hubiese aumentado considerablemente y se hubiese tenido que utilizar otro método para lograr la optimización. Se logró obtener buenos resultados en el caso de la optimización de caudales para el proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón.

Al realizar la optimización utilizando programación dinámica determinística discreta para el proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón, como requisito se debe tener toda la información de la conformación del proyecto, ya que esto permite que los resultados sean lo más acertados posibles. En el caso de esta disertación los valores para el factor K tanto para el aprovechamiento Pilatón-Sarapullo y para el aprovechamiento Toachi-Alluriquín se obtuvieron del análisis de planos e información técnica. La implementación de una optimización mediante programación dinámica es viable, dado que los dos aprovechamientos interactúan constantemente entre sí, y un cambio en alguno afecta a ambos.

Al realizar la optimización con las respectivas consideraciones como: variación de cotas, variación de caudales, variación en las pérdidas. Podemos observar que el cálculo provisto por HIDROTOAPI S.A. esta correctamente realizado pero no a un detalle minucioso. Por otro lado los cálculos realizados en esta disertación nos muestran que con un adecuado manejo del proyecto, este puede trabajar continuamente sin interrupciones.

Al llevar a cabo el proceso de optimización podemos observar que con un mejor manejo del proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón, este podría tener un factor de planta equivalente a 1 lo cual es distinto al factor de planta previamente entregado de 0,85. De esta forma el proyecto hidroeléctrico podría estar siempre en funcionamiento exceptuando mantenimientos de rutina y a su vez entregar una mayor energía.

5.2. Recomendaciones

Cuando se realiza un proceso de optimización mediante programación dinámica es recomendable recopilar todos los datos disponibles, para de esta forma determinar que método se debe utilizar, dado que según los datos que se tengan se podrá realizar una aproximación mediante programación dinámica determinística o programación dinámica estocástica, además mientras más datos se puedan obtener el problema será más fácil de solucionar ya que existirán menos variables.

Respecto al proyecto se recomienda realizar una optimización a un nivel de detalle superior que considere: agua perdida por infiltraciones, evaporación y estacionalidad. Lo cual nos entregará resultados reales ya que consideraría todas las variables existentes. En lo que tiene que ver con la información disponible, se recomienda realizar un levantamiento de información utilizando estaciones hidrométricas que permitan tener información real en lapsos de tiempo menores.

Para el proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón se recomienda implementar un proceso de optimización, puesto que al ser uno de los proyectos emblemáticos y más importantes del país esto podría marcar una pauta para que otros proyectos hidroeléctricos tengan planes de optimización y a lo largo del tiempo estas inversiones en procesos de optimización resultarán en ahorros monetarios para el país.

Para cualquier proceso de optimización que se lleve a cabo se recomienda verificar los resultados que se obtengan, ya que estos resultados son bastante sensibles si se llega a modificar tan solo una variable. Por lo que, es importante saber interpretar los resultados que se obtengan y cualquier anomalía en ellos.

Al analizar los resultado obtenidos se recomienda al equipo del proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón reevaluar los análisis económicos con un distinto factor de planta, ya que el factor de planta de 0,85 provisto por HIDROTOAPI S.A. podría llegar hasta 1, dado los resultados mostrados en esta disertación.

ANEXOS

Anexo : Año seco del río Pilatón (m³/s)

AÑO SECO											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
7,85	15,15	19,36	24,67	24,04	14,12	8,58	8,33	7,62	7,14	9,28	6,90
6,90	17,93	21,03	27,61	22,69	17,93	9,10	8,97	7,62	7,14	8,97	7,38
8,65	18,64	24,36	28,56	22,29	14,20	9,72	9,04	7,62	7,30	8,57	6,66
9,12	19,91	22,37	28,01	21,34	13,25	9,46	8,33	7,46	7,30	9,12	6,74
8,81	16,66	22,14	26,90	20,71	13,81	9,31	8,25	7,46	7,30	8,73	7,22
9,28	16,03	20,71	26,66	19,91	15,87	9,10	7,93	7,30	7,93	8,33	7,70
9,76	14,76	19,76	23,48	19,44	16,11	8,79	8,41	7,30	7,38	8,33	7,46
10,00	13,41	18,80	24,28	19,04	15,71	9,00	8,25	7,46	8,89	7,93	7,06
9,92	15,39	18,64	24,12	18,01	15,31	8,53	7,62	7,46	8,65	7,62	7,38
10,71	16,74	19,60	25,63	17,38	15,00	8,63	7,38	7,46	8,17	7,38	7,62
10,31	14,04	18,96	24,28	17,45	14,04	8,58	7,30	7,30	7,62	8,09	7,85
10,00	19,04	17,45	24,20	16,50	13,57	8,37	6,98	7,30	7,78	7,93	8,81
9,44	19,28	16,34	28,01	16,26	13,49	8,63	6,74	7,06	7,70	7,93	8,01
9,28	18,25	16,66	28,01	16,03	13,17	8,32	6,74	6,66	7,62	7,85	7,38
8,57	17,77	16,74	27,37	15,23	12,54	8,37	7,56	6,90	7,85	7,70	6,19
11,66	18,49	21,03	26,74	14,76	12,30	7,96	6,66	6,90	8,41	8,09	6,19
10,95	18,09	20,23	25,07	20,31	12,30	8,37	8,01	6,66	8,33	7,93	9,76
11,82	18,64	24,91	25,15	19,76	12,14	8,22	7,22	6,98	8,25	7,70	9,60
13,73	18,25	27,21	24,36	17,85	12,38	8,06	7,38	7,38	8,01	7,70	9,84
14,20	17,69	21,93	22,93	16,98	13,88	8,22	7,62	7,46	8,33	7,93	9,12
14,20	22,85	21,66	21,66	15,95	12,85	7,80	7,22	7,14	9,44	8,01	7,62
16,58	20,79	20,63	19,44	15,47	13,49	7,80	7,93	7,38	8,49	7,14	9,84
16,50	21,98	20,23	19,36	15,47	11,03	7,64	7,38	6,90	8,65	7,14	9,28
15,39	22,93	19,04	19,12	15,00	11,50	7,80	6,90	6,98	8,97	7,14	8,73
16,03	25,23	21,58	24,36	14,44	12,69	7,46	6,66	6,90	8,73	7,14	7,22
11,98	21,26	18,96	24,36	14,28	13,01	7,78	7,46	7,14	8,33	7,14	7,93
9,84	16,42	18,49	24,20	14,52	11,82	7,64	6,98	7,30	9,12	7,14	7,93
9,28	19,76	18,25	24,12	13,81	10,87	7,80	6,82	7,14	9,84	7,30	7,85
13,25	-	20,23	24,67	13,65	11,11	7,64	6,82	7,30	9,20	6,90	8,17
14,36	-	25,31	24,91	13,25	11,27	7,38	6,66	7,14	9,28	7,14	7,70
16,34	-	24,60	-	13,33	-	7,12	6,82	-	9,28	-	7,93

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Año seco del río Toachi (m³/s)

AÑO SECO											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
12,61	20,17	32,43	30,52	42,51	20,43	14,87	12,17	10,17	8,95	11,02	11,56
12,26	19,74	33,91	36,25	43,21	24,60	14,69	12,00	10,00	8,87	11,19	11,56
12,00	19,30	33,47	34,52	43,64	19,82	17,30	11,91	10,00	9,04	10,78	11,30
11,65	20,17	33,65	35,65	40,86	19,65	16,87	11,74	9,13	8,95	10,61	11,48
12,08	19,91	34,43	34,95	38,34	20,69	16,17	11,65	9,65	8,87	11,04	11,22
12,52	20,00	33,04	33,12	36,95	21,65	15,56	11,65	9,56	8,78	11,13	11,13
12,87	24,60	31,56	31,91	38,25	20,95	15,39	11,56	9,56	8,69	10,95	10,95
13,39	25,13	29,73	37,21	36,08	22,17	14,87	11,48	9,30	9,01	10,95	10,95
13,13	24,78	29,12	38,43	34,78	22,52	14,95	11,30	9,22	8,98	10,95	11,39
12,87	24,60	30,17	39,38	32,25	19,82	14,43	11,13	9,39	8,52	10,87	11,56
13,74	23,91	23,39	39,56	32,25	19,13	15,13	11,04	9,30	10,61	10,26	11,74
13,91	24,26	30,08	37,82	30,43	18,78	15,21	11,22	9,30	10,26	10,09	12,26
13,48	27,19	33,12	43,30	29,56	18,95	15,48	11,65	9,22	11,08	10,26	11,39
13,30	26,60	29,21	43,30	28,78	18,43	15,48	11,48	9,36	11,22	10,78	11,91
14,52	25,21	30,08	46,36	27,73	17,39	15,04	11,36	9,33	10,61	10,61	12,35
13,39	25,47	33,12	39,30	26,95	17,82	15,56	11,33	9,30	9,22	11,56	12,00
14,00	26,86	32,17	39,64	31,65	17,56	15,21	11,74	9,39	9,22	12,17	12,87
14,61	25,73	31,65	42,34	30,52	18,00	17,39	11,74	9,39	9,04	11,91	11,82
16,26	27,13	31,30	36,51	29,56	17,30	17,21	11,48	9,22	9,22	12,00	12,26
16,52	24,60	30,34	33,99	28,08	18,17	14,52	11,30	10,35	9,39	11,56	14,00
17,30	23,21	30,60	38,34	26,52	18,43	14,26	11,13	10,00	10,00	11,82	13,39
25,56	23,56	32,43	36,69	25,39	17,82	13,82	10,87	9,82	10,26	12,08	13,21
19,30	24,26	31,47	34,52	24,78	17,13	13,56	10,78	9,65	10,00	11,65	12,52
19,65	25,65	31,47	33,04	23,91	16,43	13,21	10,61	9,56	9,65	11,65	11,82
20,08	30,52	36,43	47,12	23,21	15,91	13,04	10,69	9,30	9,30	11,82	11,91
19,13	36,60	41,91	40,95	22,60	15,39	12,61	10,61	9,22	9,22	11,82	10,95
19,30	28,05	40,08	45,56	21,91	15,30	12,52	10,61	9,22	10,00	11,82	10,95
19,30	33,30	36,78	42,25	21,56	15,13	12,26	10,61	9,13	12,17	11,56	10,87
20,87	-	36,25	40,08	20,26	15,04	12,35	10,35	9,13	12,00	11,48	11,82
20,43	-	42,51	36,69	19,04	14,78	12,17	10,43	8,95	11,65	11,74	11,82
20,26	-	40,51	-	18,87	-	12,17	10,26	-	11,48	-	12,69

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Año lluvioso del río Pilatón (m³/s)

AÑO LLUVIOSO											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
102,35	83,78	107,35	63,71	89,34	47,21	63,31	29,28	19,76	38,48	28,88	53,48
88,23	96,32	107,98	73,94	99,89	50,62	64,11	20,55	21,03	36,97	29,20	63,95
69,26	102,51	120,12	62,12	113,54	50,62	63,08	21,10	21,34	37,53	30,86	55,54
56,97	122,58	108,78	109,73	65,85	63,71	64,11	21,82	24,44	32,21	36,02	51,97
50,86	163,68	114,88	104,97	69,74	52,05	63,87	19,52	20,79	34,51	37,37	49,43
174,76	109,89	122,42	84,58	70,77	52,13	65,30	19,36	19,12	29,44	30,39	47,52
67,92	132,58	129,72	86,08	76,96	53,40	63,15	18,96	17,69	30,31	31,18	58,47
49,83	117,34	129,80	97,83	78,78	55,38	64,90	19,68	23,01	31,42	43,95	93,46
86,08	120,12	152,17	106,95	129,80	56,17	64,27	20,55	27,85	31,50	66,49	93,86
86,88	129,09	144,87	107,35	106,55	56,49	62,84	21,10	21,82	31,58	49,59	74,98
120,20	107,19	148,05	149,56	177,32	55,93	60,30	21,82	24,60	33,32	38,08	57,05
66,88	94,57	150,19	127,10	139,64	56,73	56,17	22,53	21,90	68,07	36,50	47,37
52,44	121,55	148,52	95,92	141,15	57,44	34,91	23,48	21,74	44,51	39,04	41,73
73,47	92,51	127,74	112,35	143,29	58,08	24,60	24,04	22,93	40,30	55,54	46,89
94,10	99,25	136,39	112,98	102,35	56,49	24,04	24,52	22,45	36,97	49,67	64,03
56,49	117,34	113,54	118,53	111,23	56,81	24,36	25,63	22,45	33,96	42,21	66,09
106,95	172,41	121,55	145,83	54,59	57,60	22,61	20,55	22,69	35,07	51,02	84,34
67,12	86,08	129,40	89,34	55,93	59,66	21,58	20,95	22,85	28,48	61,73	66,17
63,23	86,08	129,24	106,24	89,34	59,27	21,34	21,82	23,88	25,47	58,95	69,66
85,93	93,70	125,60	182,48	63,23	58,55	21,03	18,25	26,58	26,98	65,06	69,03
70,06	92,75	135,75	72,52	74,18	58,71	21,03	18,33	44,99	25,79	67,44	66,09
74,26	109,81	138,69	93,30	93,86	59,90	20,47	19,12	27,93	35,07	57,12	58,31
78,47	99,25	196,45	74,18	105,05	60,77	19,36	17,53	46,02	49,59	54,82	55,38
69,18	88,94	186,53	65,93	76,88	61,96	19,20	17,06	27,21	36,50	66,17	53,00
105,76	92,67	187,96	55,22	75,61	61,96	18,41	16,66	28,48	29,83	64,98	52,21
190,50	167,25	86,08	80,77	49,11	62,04	18,41	18,41	30,47	26,82	77,20	55,14
126,86	135,04	112,74	75,21	48,95	63,23	17,69	19,91	27,13	32,53	67,99	60,62
110,92	116,95	100,05	99,49	43,40	62,60	19,36	19,91	35,07	35,39	60,46	75,93
101,48	-	83,86	135,04	43,80	63,71	19,76	28,01	37,61	28,88	59,43	78,31
77,20	-	69,18	89,34	45,70	62,44	20,07	22,37	31,58	28,96	58,24	64,74
78,94	-	79,58	-	45,70	-	20,15	23,48	-	27,93	-	65,77

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Año lluvioso del río Toachi (m³/s)

AÑO LLUVIOSO											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
77,89	149,88	259,08	119,19	104,76	77,55	52,69	30,08	31,73	35,30	63,64	98,85
99,98	150,41	176,40	174,05	98,59	71,29	44,60	28,78	29,82	33,04	47,56	71,20
92,07	125,72	144,93	166,92	131,19	125,89	42,51	29,65	26,69	43,56	52,95	94,24
82,07	151,62	115,89	194,92	103,02	77,12	62,86	29,73	25,13	62,16	56,16	104,76
76,07	186,92	130,24	130,93	105,10	82,85	52,36	27,21	28,55	37,91	72,77	115,89
93,03	148,93	163,79	137,54	113,80	77,03	53,64	25,56	27,82	40,34	54,60	125,54
98,07	129,28	160,23	134,06	102,85	79,72	56,16	27,13	24,60	40,25	63,90	129,37
82,59	157,88	178,31	140,15	172,58	71,64	50,77	27,47	31,99	44,60	77,90	110,76
116,06	142,49	140,06	116,76	113,02	67,90	44,86	25,13	43,90	37,73	75,12	111,20
107,72	123,89	145,45	106,50	121,80	97,72	39,99	24,00	32,52	36,34	67,73	100,76
83,03	133,97	111,89	165,19	99,72	79,81	38,51	25,13	26,34	36,86	69,29	114,07
88,42	113,98	119,19	118,59	114,85	68,60	39,30	24,26	24,43	50,86	67,81	92,59
95,37	151,97	159,10	133,89	115,28	59,56	38,69	24,60	26,78	51,29	79,55	92,94
110,94	135,89	116,33	254,73	97,89	65,03	36,69	24,08	31,04	35,65	80,25	78,42
180,14	98,16	120,76	299,16	88,16	59,47	37,91	23,21	24,44	52,86	85,55	88,94
104,80	109,81	163,01	247,69	95,37	56,60	36,86	22,95	25,56	35,99	66,25	83,98
168,58	155,27	258,04	231,00	104,75	68,42	39,04	22,69	28,17	37,21	76,33	87,98
100,24	123,02	266,73	132,24	132,41	58,25	34,86	22,43	28,17	46,95	73,64	82,59
97,81	121,11	282,90	123,45	116,41	63,03	33,91	22,17	34,69	43,04	65,29	90,16
118,62	140,93	217,78	141,19	129,37	60,68	32,60	30,78	29,56	29,30	71,90	82,25
94,59	154,32	210,31	136,40	89,11	59,21	31,65	27,21	29,30	34,17	88,16	74,25
95,37	154,06	302,73	136,91	126,93	63,47	30,26	28,52	38,69	51,12	73,55	94,50
114,15	142,93	291,08	170,05	86,24	72,68	29,47	27,73	71,64	46,43	66,86	66,77
118,93	154,06	235,35	122,76	79,55	77,64	32,95	25,56	41,38	54,34	84,77	60,34
200,92	273,77	178,66	103,20	77,55	75,38	29,30	27,39	42,51	36,86	85,03	59,12
249,69	243,78	196,31	139,02	78,33	69,29	28,52	36,60	38,86	41,64	57,99	91,20
153,88	188,31	208,74	127,28	94,42	63,47	28,95	39,30	39,30	33,82	70,51	85,38
148,93	167,01	123,98	138,41	87,11	57,55	28,17	30,95	33,91	72,59	86,51	63,65
153,28	-	119,37	129,98	134,58	55,38	27,39	30,52	40,25	58,16	95,81	75,46
118,06	-	176,58	98,94	79,20	53,03	30,43	29,04	42,25	49,56	84,68	136,23
110,41	-	131,45	-	70,16	-	26,86	36,08	-	55,21	-	73,90

Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Año medio del río Pilatón (m³/s)

AÑO MEDIO											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
26,83	41,85	43,90	42,53	46,89	28,32	19,52	13,17	12,38	15,89	15,22	19,57
26,06	49,38	46,54	45,01	48,04	28,29	19,07	12,78	12,30	15,88	14,84	19,60
24,11	46,65	43,69	43,88	47,22	28,85	18,87	12,80	11,87	16,00	15,55	18,83
23,58	52,70	42,62	48,99	42,56	28,42	18,89	12,82	12,47	15,44	16,25	18,43
25,26	56,87	43,28	48,48	42,54	27,97	18,69	12,37	12,16	16,33	16,88	18,47
34,30	54,16	45,32	48,25	41,37	27,36	18,46	12,32	12,38	15,05	16,13	18,60
28,19	53,16	47,66	47,47	40,86	27,82	18,00	12,32	11,94	15,49	16,12	19,62
27,06	51,44	49,00	49,06	39,05	26,57	18,05	12,27	12,45	15,46	17,12	21,00
29,35	49,94	52,77	49,38	41,66	25,82	17,77	12,19	12,46	16,25	18,54	21,00
30,58	49,84	49,87	51,16	43,00	26,11	17,70	12,00	12,50	15,59	18,97	20,38
32,38	48,63	45,76	53,14	44,03	26,80	17,43	11,90	12,72	16,71	18,47	18,83
31,92	44,44	45,58	53,56	42,65	26,41	16,73	11,92	12,43	19,05	17,16	18,43
31,41	51,38	49,38	54,70	41,44	25,50	15,51	12,07	12,42	17,35	17,53	18,25
33,91	50,09	54,87	54,28	39,46	25,29	14,80	12,09	12,32	17,07	18,30	18,70
35,54	48,62	54,77	53,21	37,80	24,53	14,63	12,04	11,95	17,68	18,09	20,32
33,28	48,93	57,08	55,93	37,20	24,05	14,39	11,86	11,88	17,36	17,35	21,40
37,42	52,17	54,61	55,87	33,45	23,89	14,24	11,88	12,62	16,72	17,74	24,56
35,83	47,32	55,31	53,18	34,06	23,50	13,93	11,76	12,74	16,94	17,76	23,35
35,93	44,55	55,89	53,14	34,93	23,62	13,41	11,53	13,20	16,38	19,02	23,33
35,76	49,58	52,26	55,50	34,26	23,57	13,31	11,40	13,56	16,20	18,35	24,28
36,75	49,75	56,02	45,20	33,34	23,48	13,25	11,76	14,81	15,70	18,72	27,24
39,02	48,83	55,86	46,98	34,68	23,70	13,06	11,96	13,72	16,84	18,43	25,97
37,15	50,76	60,28	47,58	36,20	22,47	12,85	11,74	15,69	16,97	18,57	24,61
35,96	45,34	59,90	48,38	33,45	21,81	12,70	11,66	14,24	16,19	18,92	23,94
42,79	45,96	54,92	44,41	32,58	22,35	12,53	11,58	15,17	15,21	18,68	23,59
46,25	45,51	50,19	48,67	31,44	22,12	12,29	11,74	15,22	15,35	19,66	25,86
45,66	44,57	53,28	44,91	31,38	21,21	12,11	11,81	14,88	16,22	18,66	25,66
42,16	44,39	46,13	49,52	29,94	20,97	11,98	11,81	15,08	16,60	18,55	26,13
40,53	-	44,02	53,09	30,22	20,91	12,06	11,86	15,17	16,06	18,13	27,15
41,01	-	44,74	50,01	30,26	20,33	12,01	11,98	15,23	15,63	18,36	27,53
42,70	-	43,58	-	29,47	-	11,84	12,02	-	15,65	-	25,71

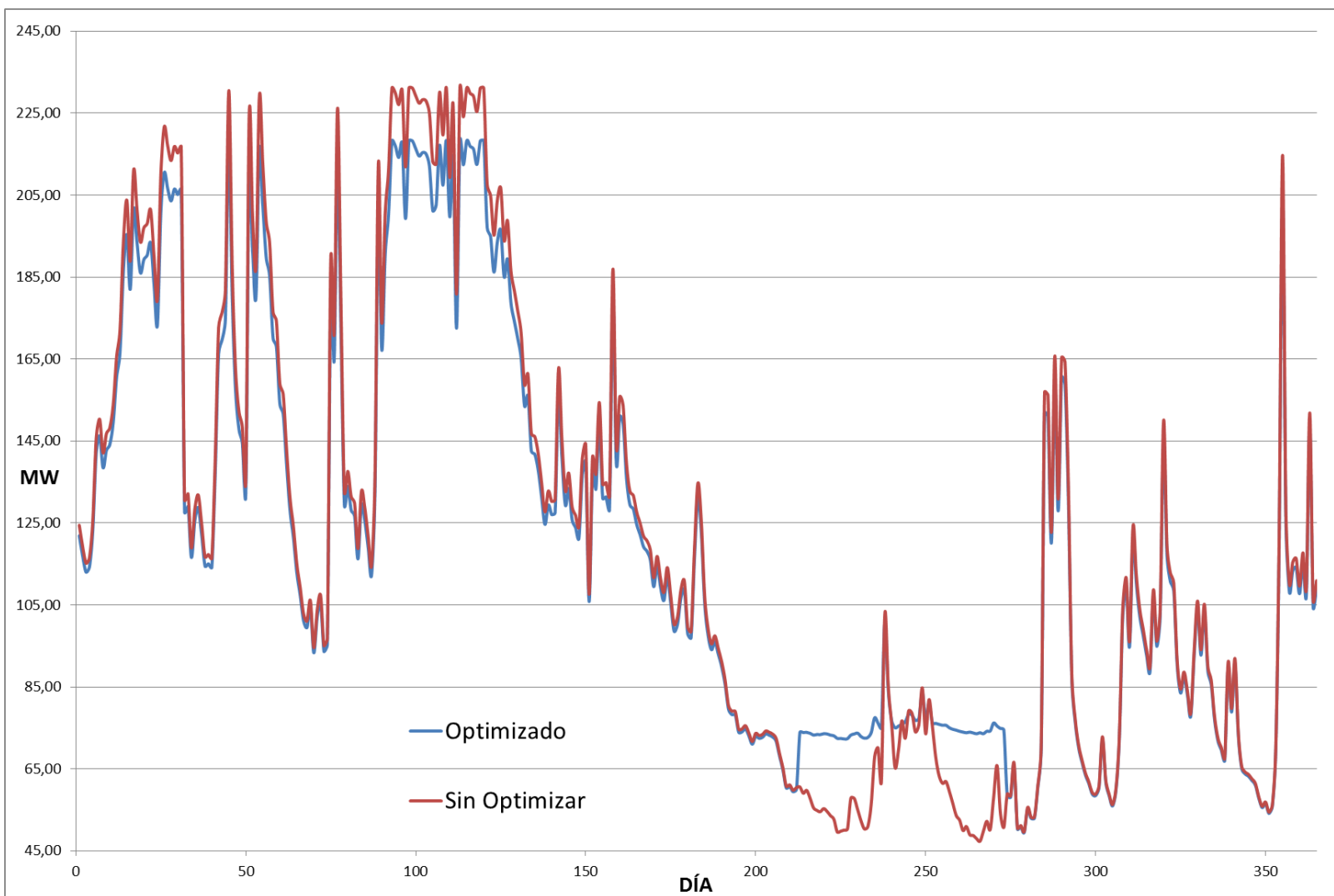
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Año medio del río Toachi (m³/s)

AÑO MEDIO											
ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
30,39	63,10	78,86	70,56	72,67	46,36	29,26	19,28	17,14	19,63	20,67	26,03
28,93	69,94	76,42	80,37	70,38	46,85	28,24	19,16	17,02	19,42	19,38	24,24
29,59	65,62	69,35	82,86	71,87	46,93	27,37	18,92	16,99	21,63	20,45	24,83
29,81	66,38	69,98	84,77	70,15	44,22	28,61	18,78	17,26	21,11	21,36	24,92
29,77	75,48	70,86	77,24	67,30	45,97	27,58	18,50	16,90	20,35	24,72	25,82
33,46	70,95	75,73	80,14	66,69	44,56	26,62	18,17	17,06	21,03	22,43	25,13
36,75	67,59	80,94	80,10	64,11	43,46	26,94	18,38	16,77	20,15	22,66	27,62
35,64	68,46	81,82	77,70	73,37	41,87	26,52	18,00	17,62	19,64	24,20	30,78
41,86	66,12	78,35	78,71	65,65	40,59	25,17	17,80	18,20	19,71	26,46	28,76
39,86	63,70	76,72	77,31	67,02	44,28	24,57	17,40	16,98	20,01	25,02	27,52
40,83	66,12	70,89	82,50	61,45	43,19	24,25	17,15	16,72	22,18	24,56	26,45
41,53	64,44	68,90	77,84	60,57	41,51	24,43	16,98	16,71	23,70	24,23	25,95
41,42	67,24	74,48	82,44	60,42	39,46	24,25	16,85	16,59	22,47	26,47	24,70
44,40	67,36	78,05	92,27	57,76	39,11	23,86	16,78	17,15	20,67	25,76	24,49
49,68	60,99	76,92	96,75	57,11	37,45	23,49	16,65	16,58	20,95	24,28	26,20
41,87	60,28	79,39	89,36	57,24	36,23	22,91	16,64	16,42	20,55	24,51	26,60
51,27	66,28	83,11	86,55	60,55	36,28	22,77	16,86	16,85	21,27	25,67	30,11
45,77	63,31	84,22	81,22	58,04	35,11	22,14	16,65	16,80	22,00	24,37	28,79
47,62	65,21	83,34	75,14	55,64	35,39	22,02	16,37	17,21	20,60	25,33	28,96
48,39	71,30	75,24	78,73	56,31	34,57	21,50	16,53	17,04	18,98	25,83	28,87
48,41	70,33	76,37	75,38	52,37	34,04	21,23	16,52	18,04	18,90	26,58	32,18
48,69	72,08	84,03	74,99	54,87	34,95	20,95	16,69	18,40	21,05	26,24	34,11
46,61	74,49	82,68	87,47	51,73	34,15	20,55	16,53	20,22	20,56	25,52	31,27
46,85	70,62	78,91	77,16	50,41	32,93	20,52	16,45	18,53	20,46	25,64	32,40
53,77	79,05	75,34	74,96	51,02	32,56	19,95	16,56	19,91	19,67	26,68	29,84
59,03	76,07	83,59	78,24	51,21	32,09	19,44	17,68	20,21	20,86	24,37	32,83
57,71	72,77	90,56	78,21	51,23	31,63	19,63	17,59	19,89	19,72	24,37	33,64
53,04	73,14	79,22	78,49	47,08	30,43	19,09	16,95	20,22	23,44	24,63	28,99
57,29	-	75,66	80,89	50,72	29,66	19,24	16,85	21,48	22,15	26,00	29,79
55,94	-	85,57	73,91	50,07	29,10	19,17	17,06	21,02	20,28	24,97	37,86
58,29	-	77,51	-	45,90	-	18,76	17,59	-	21,51	-	32,30

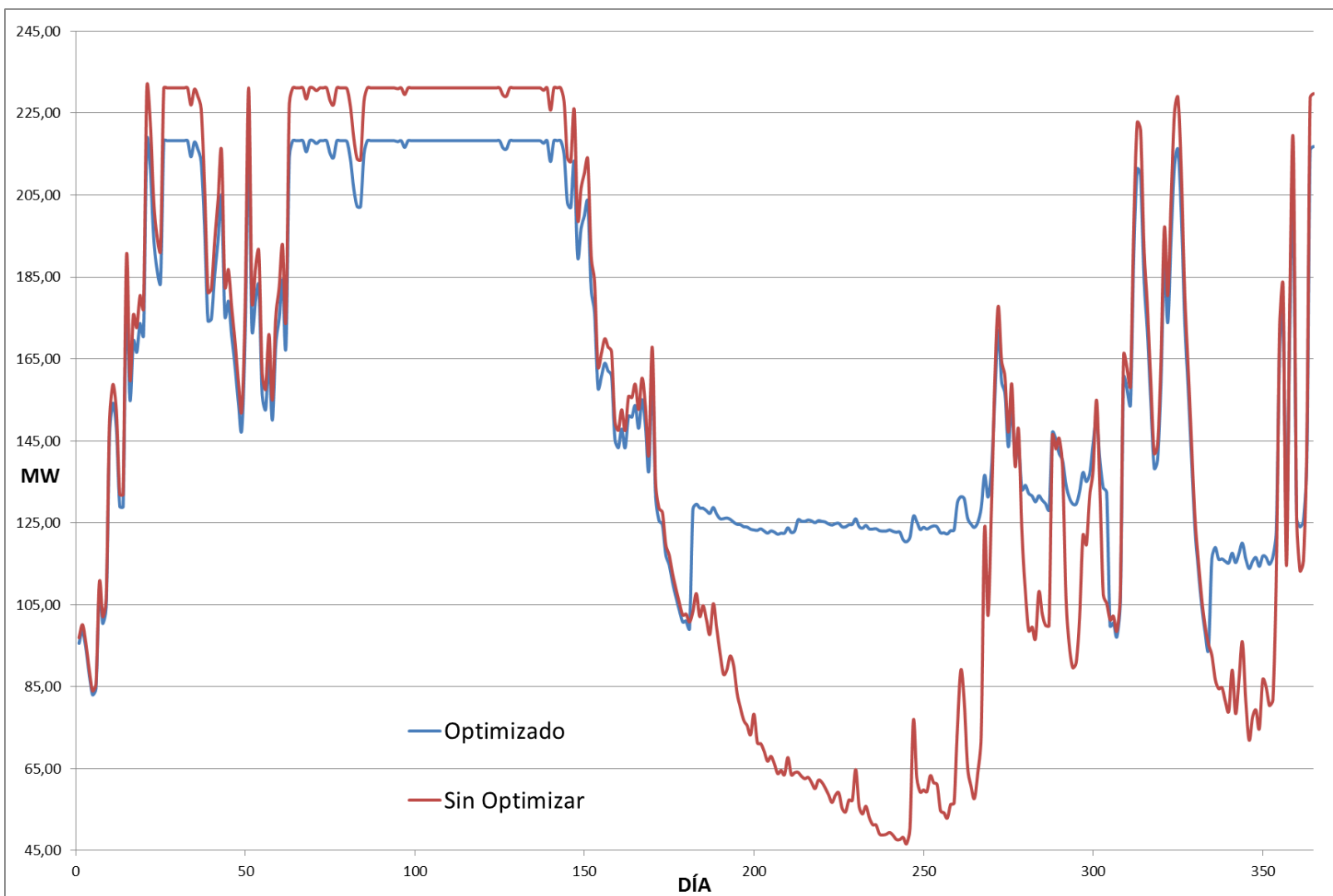
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 1



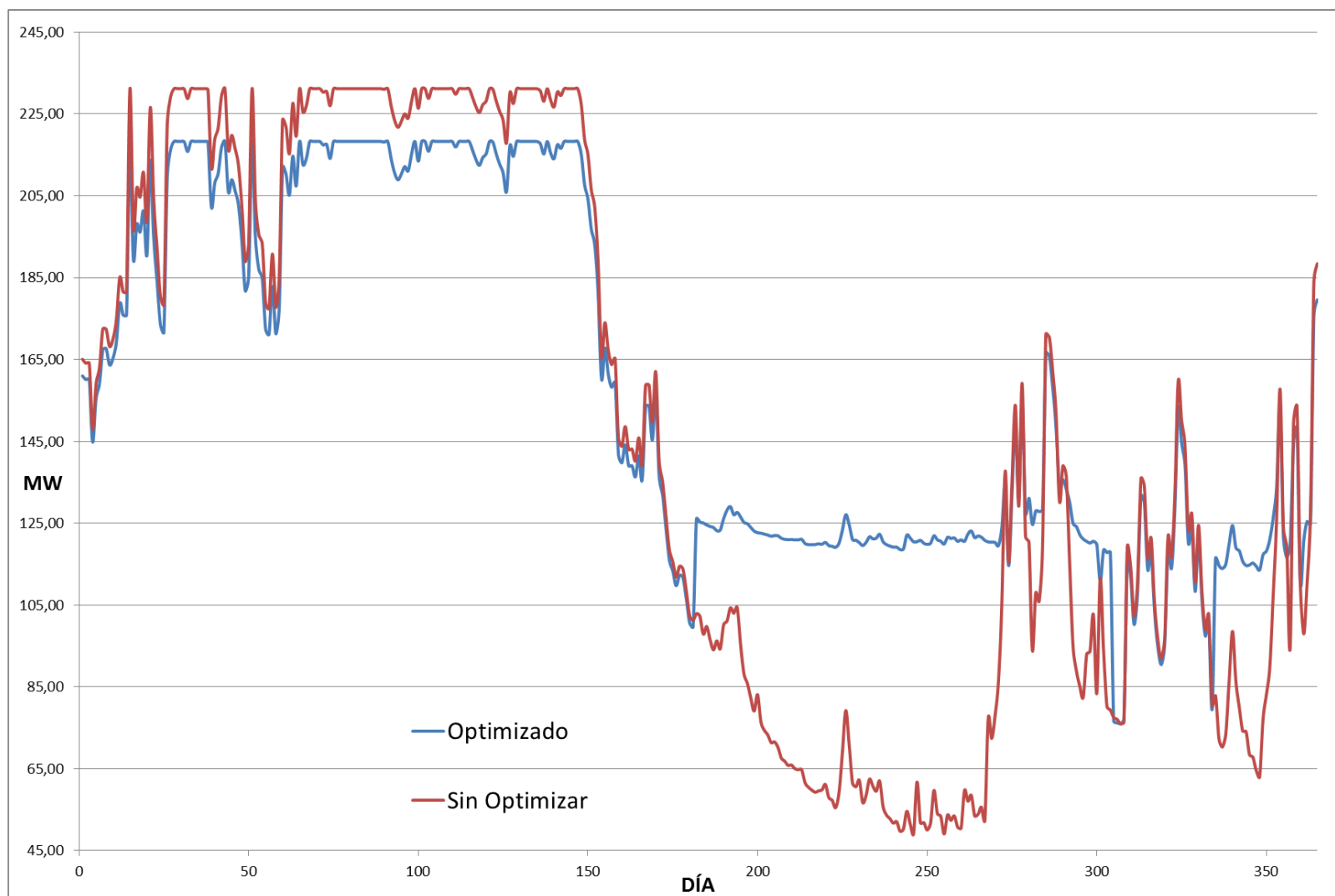
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 2



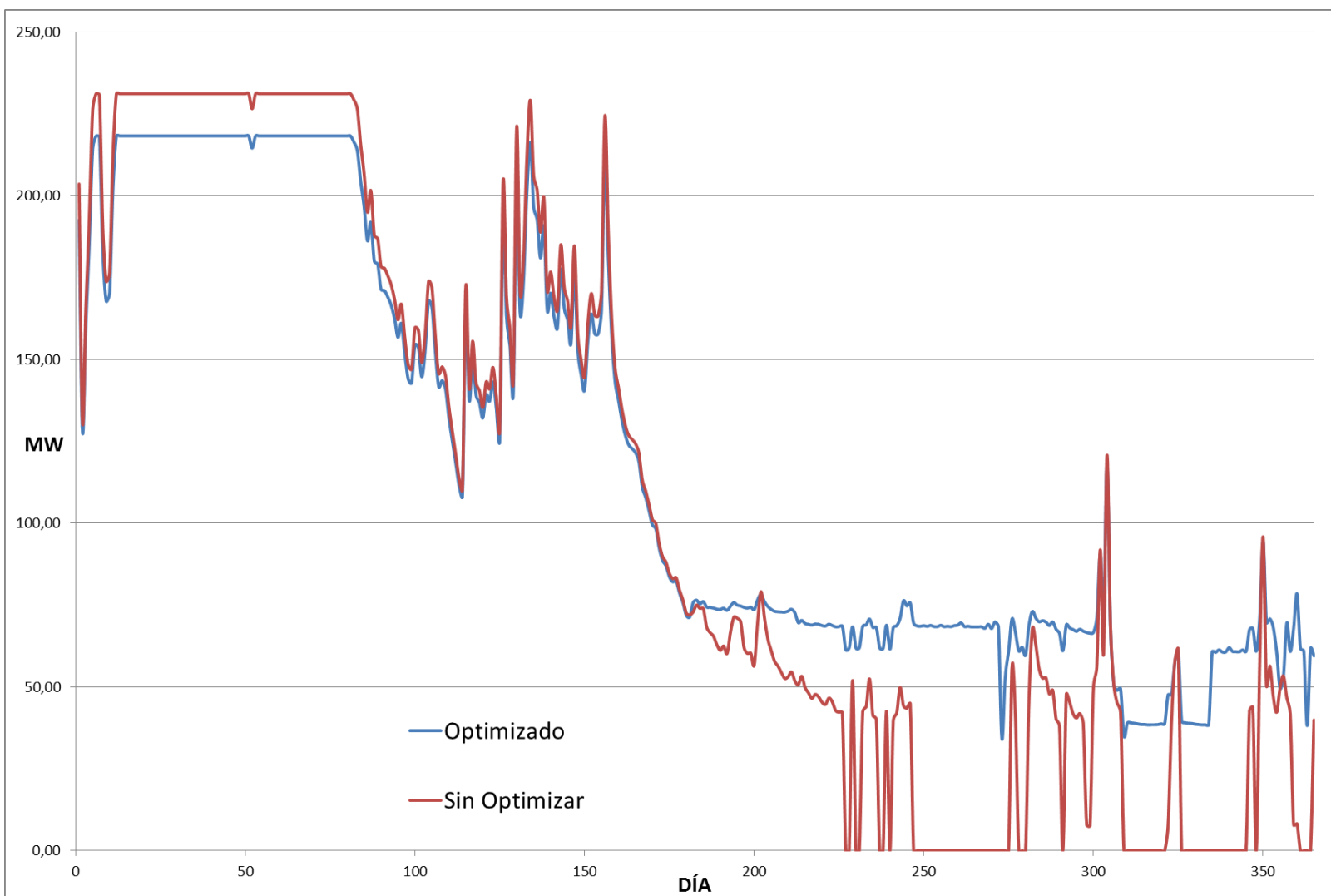
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 3



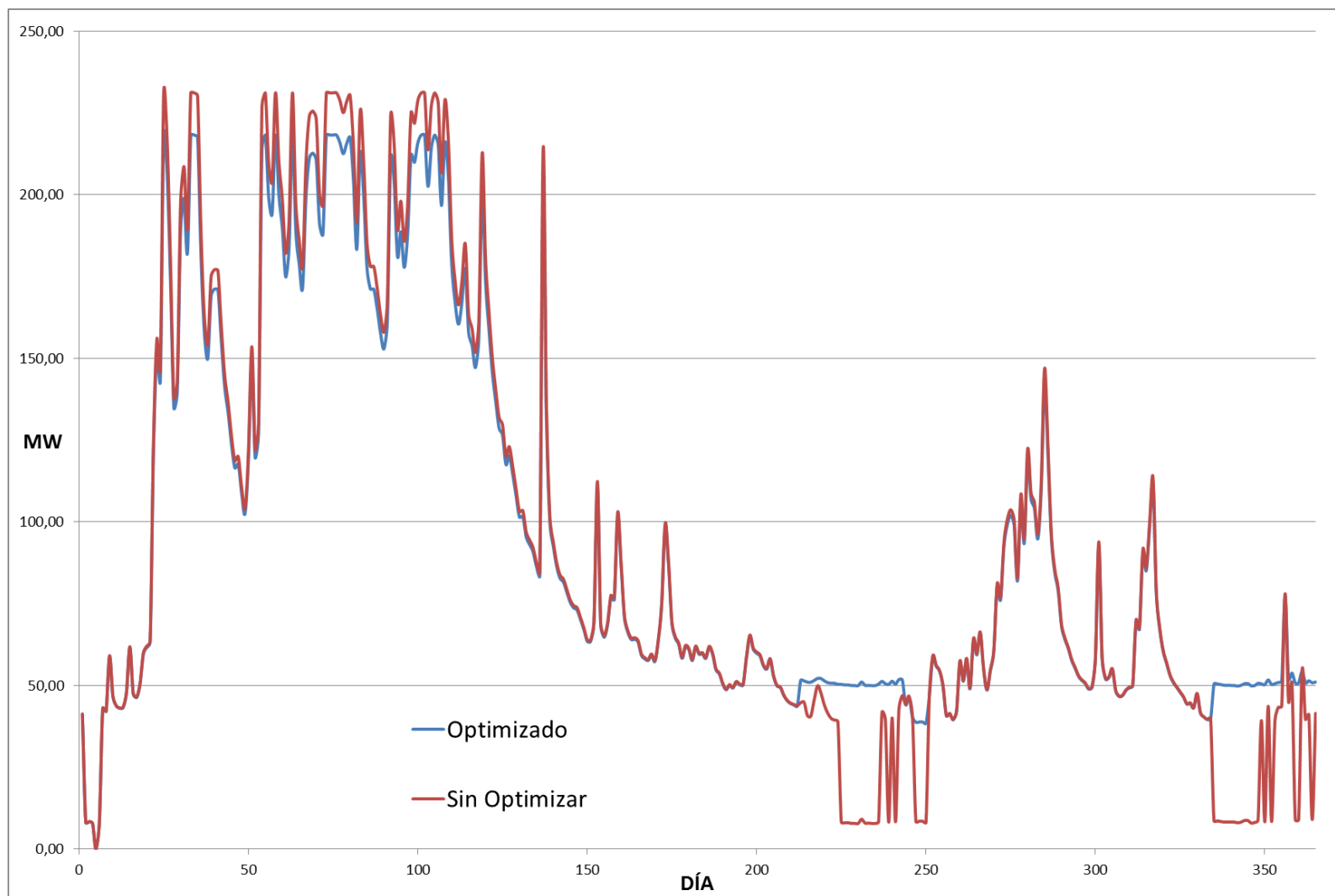
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 4



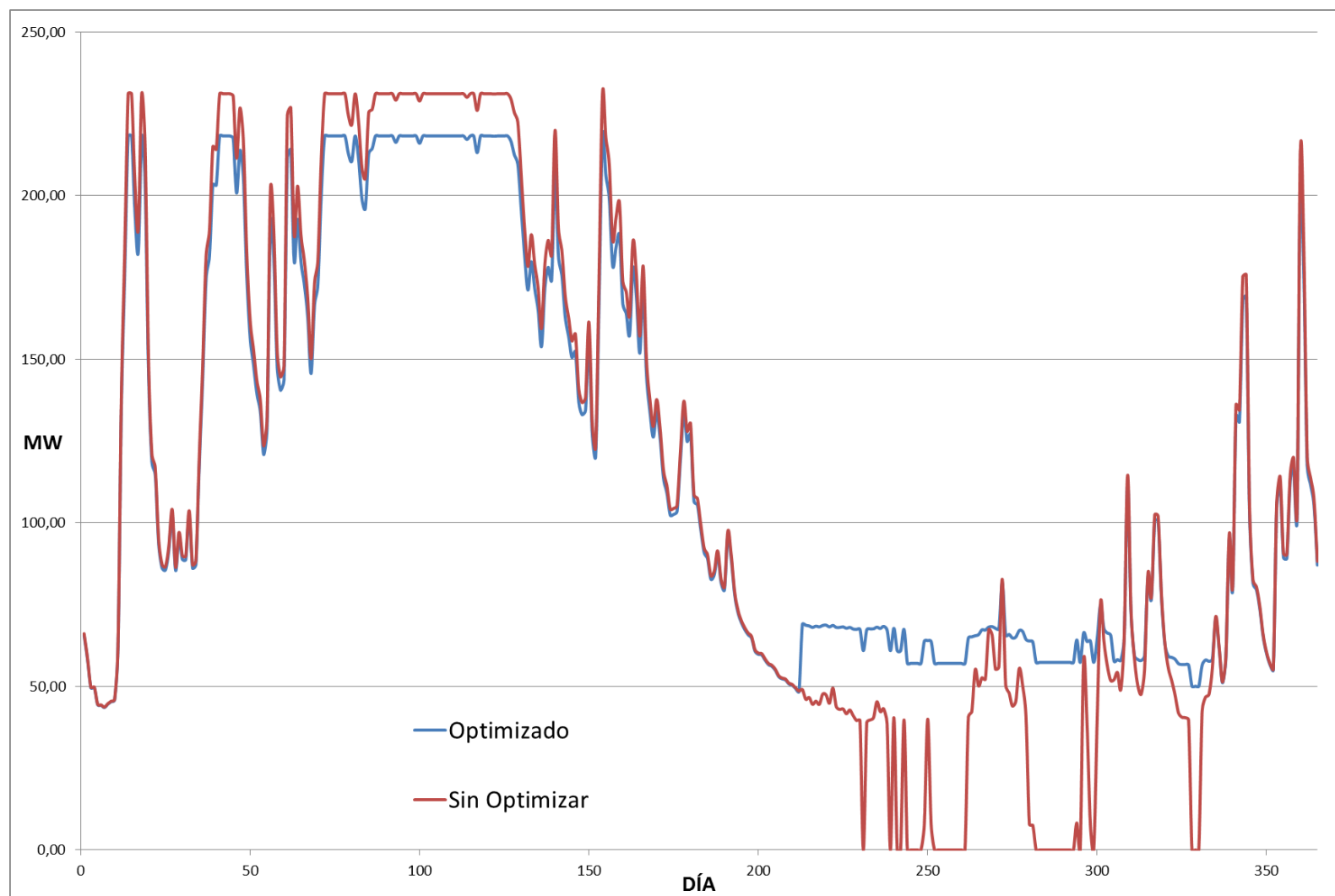
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 5



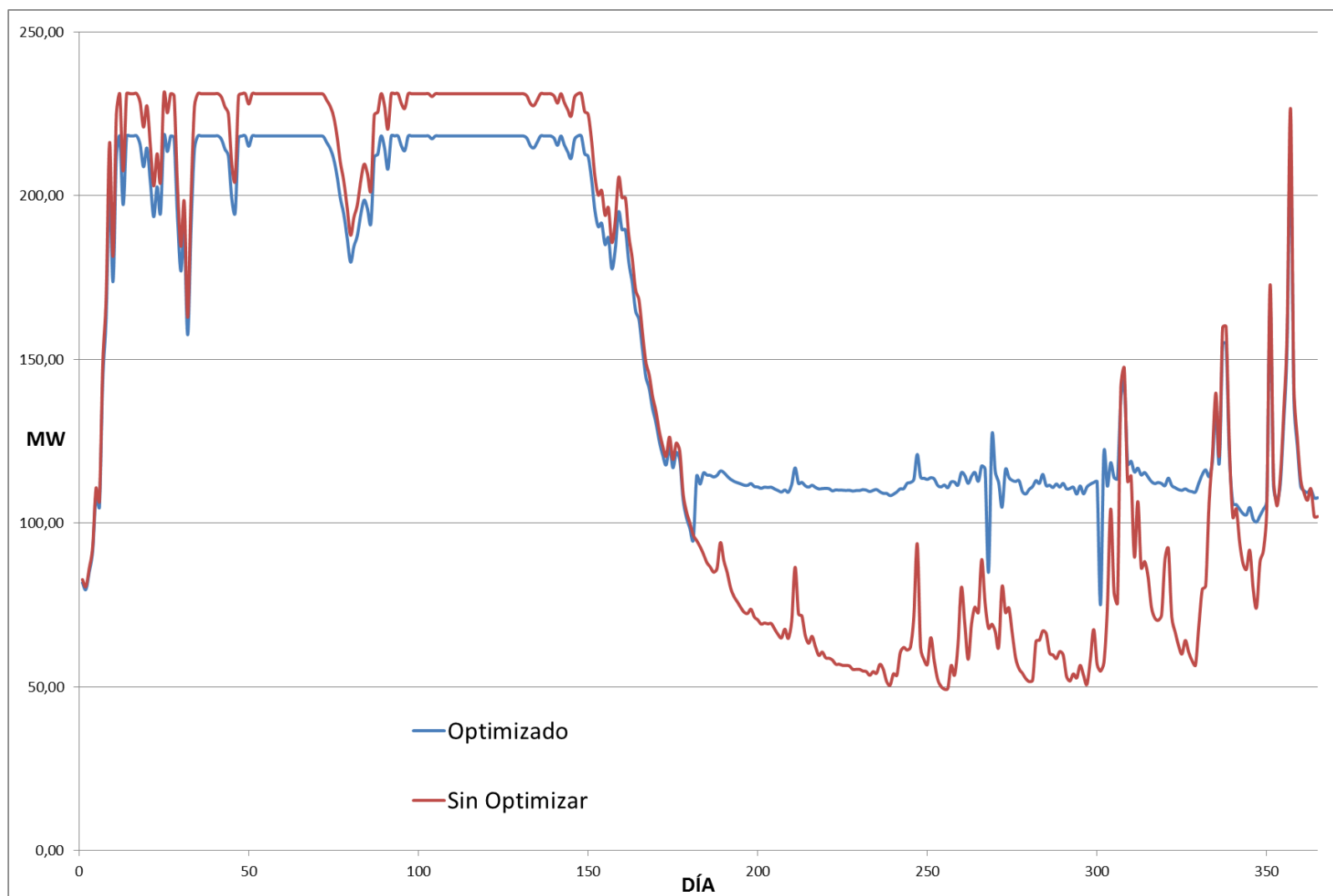
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 6



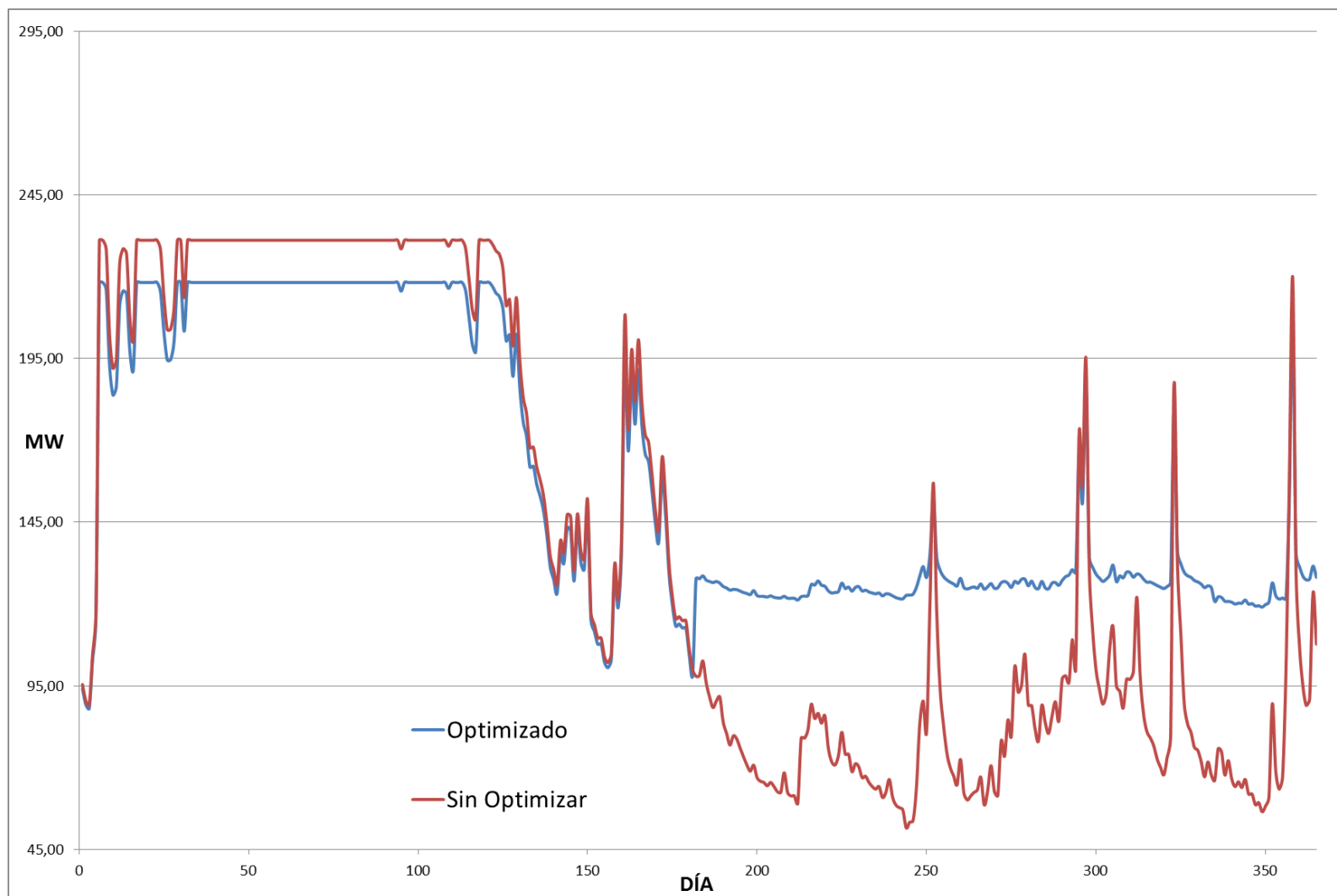
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 7



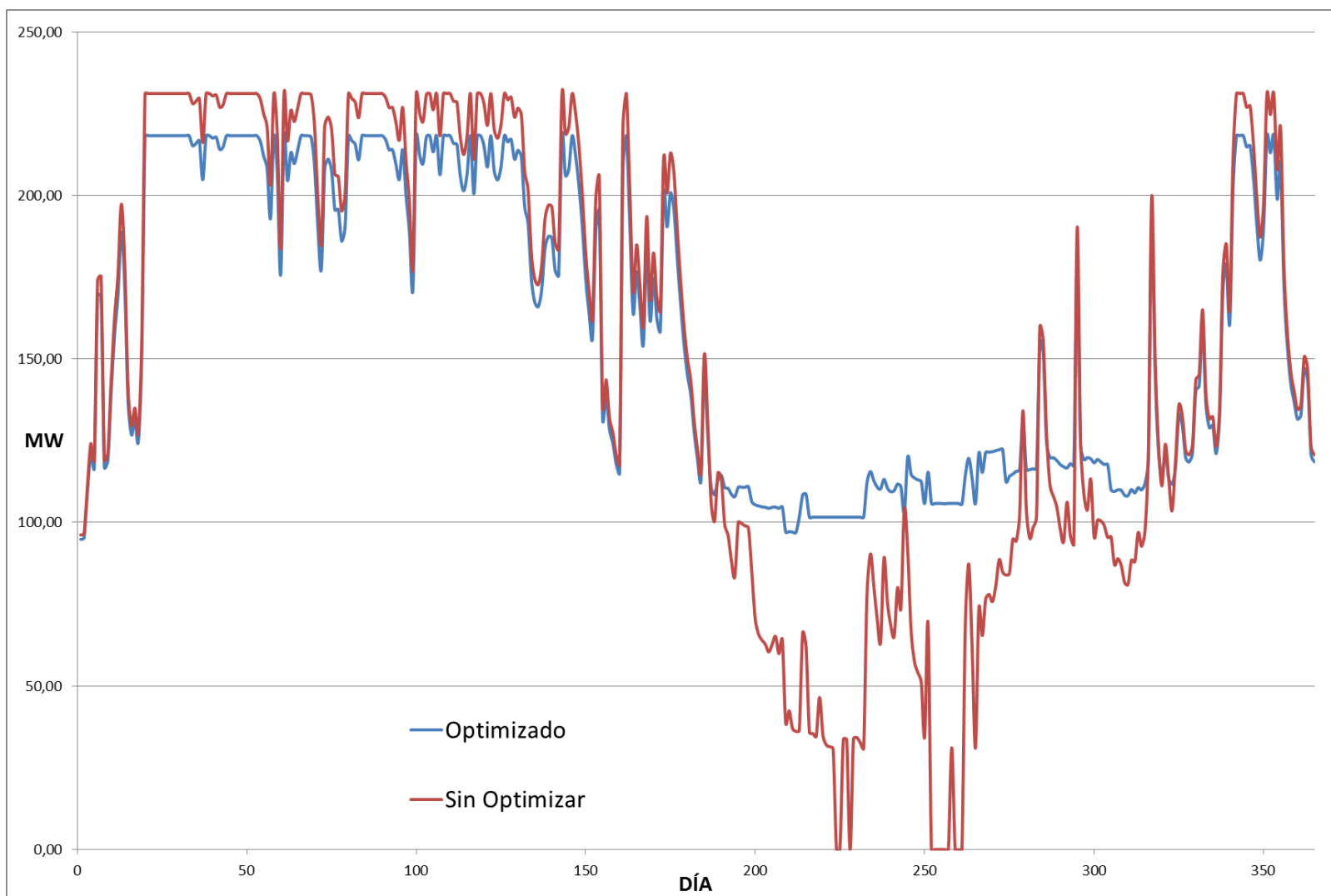
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 8



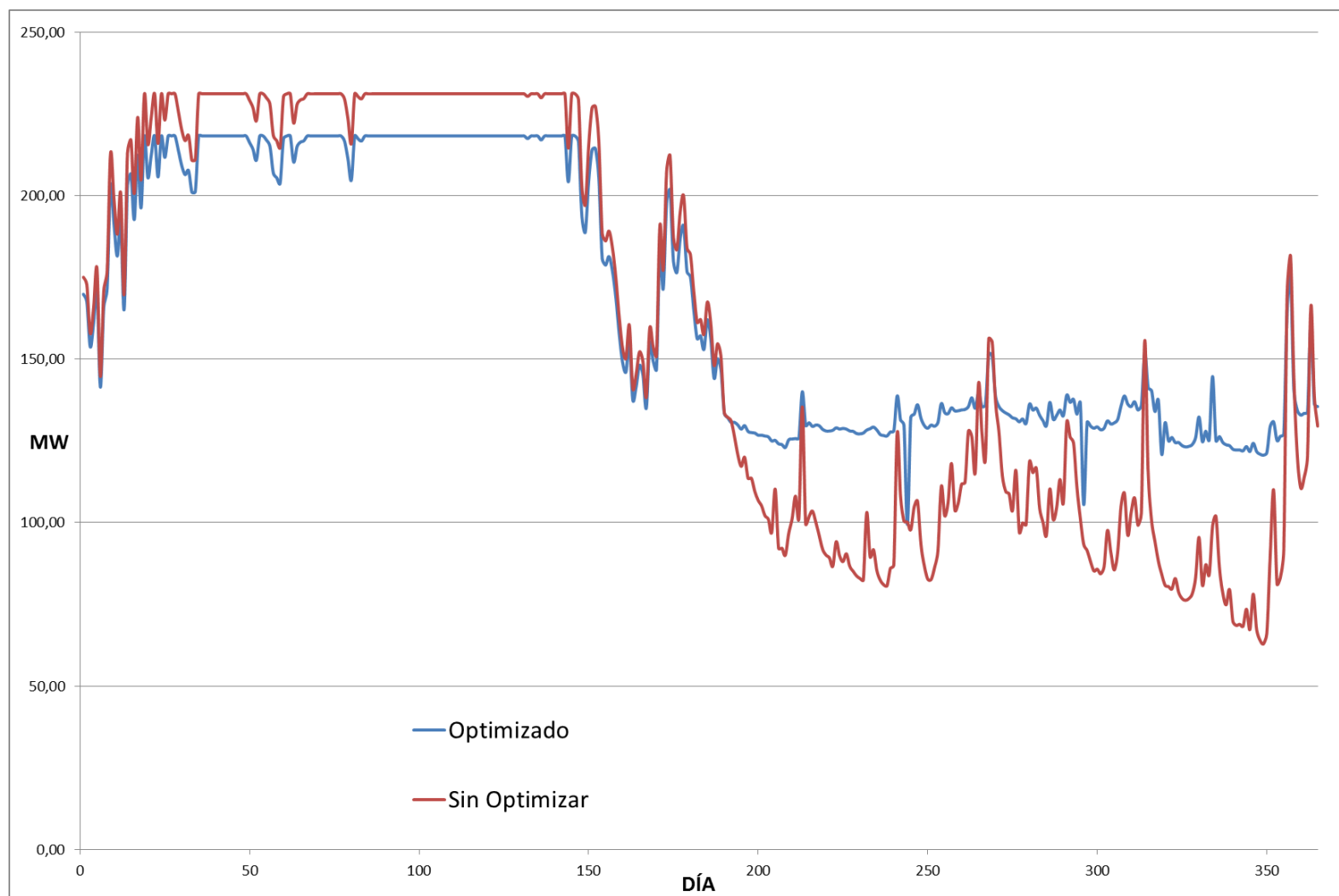
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 9



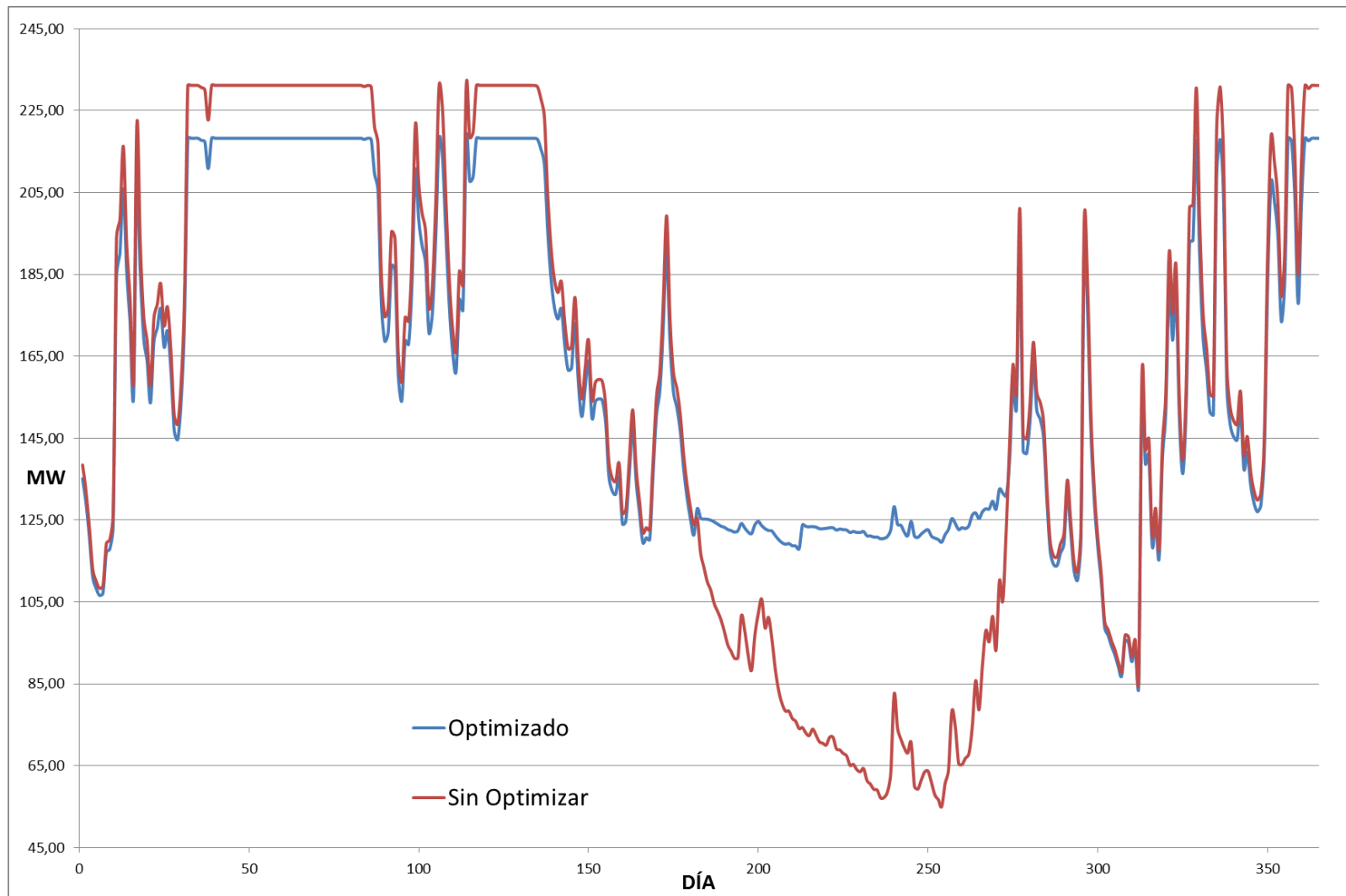
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 10



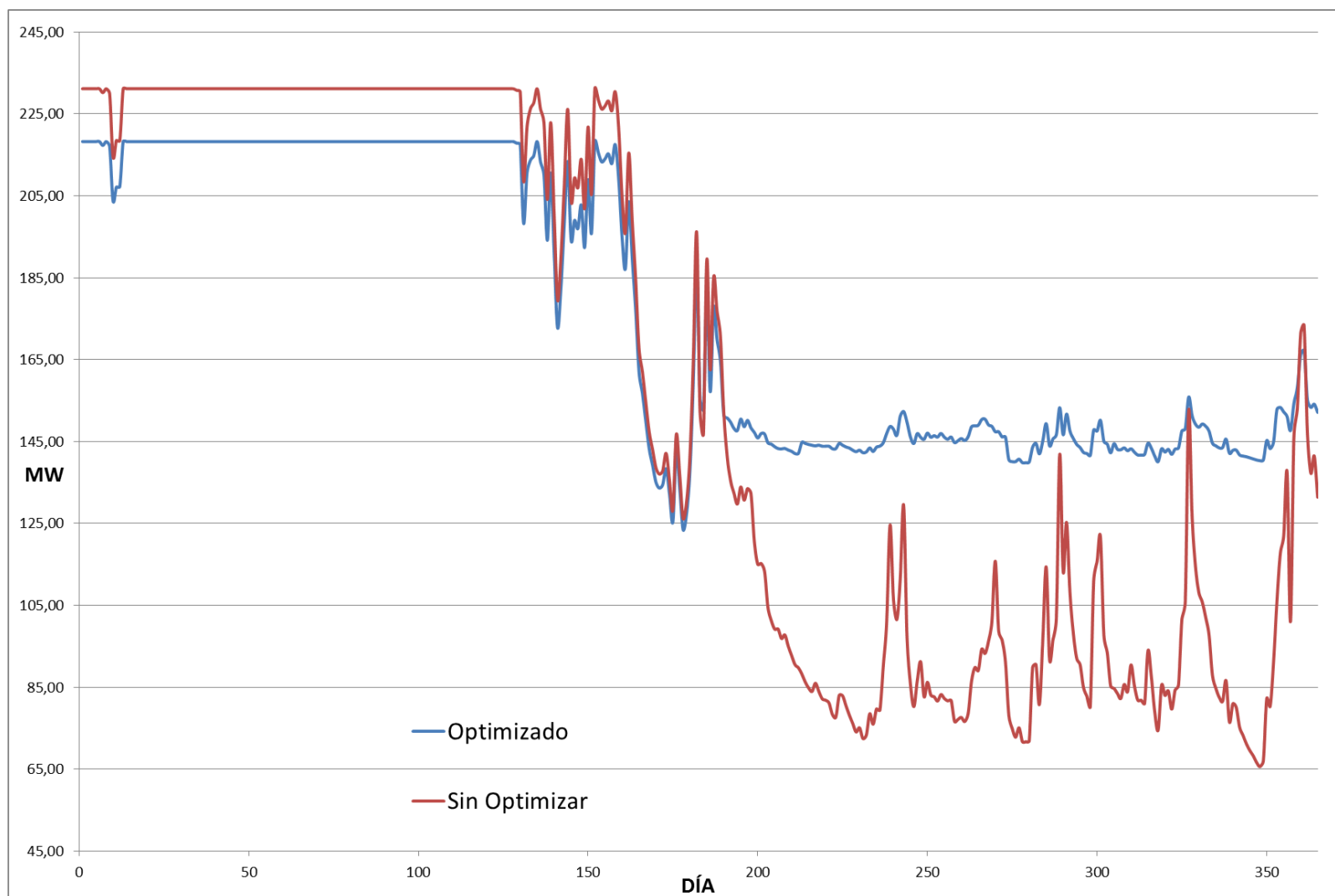
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 11



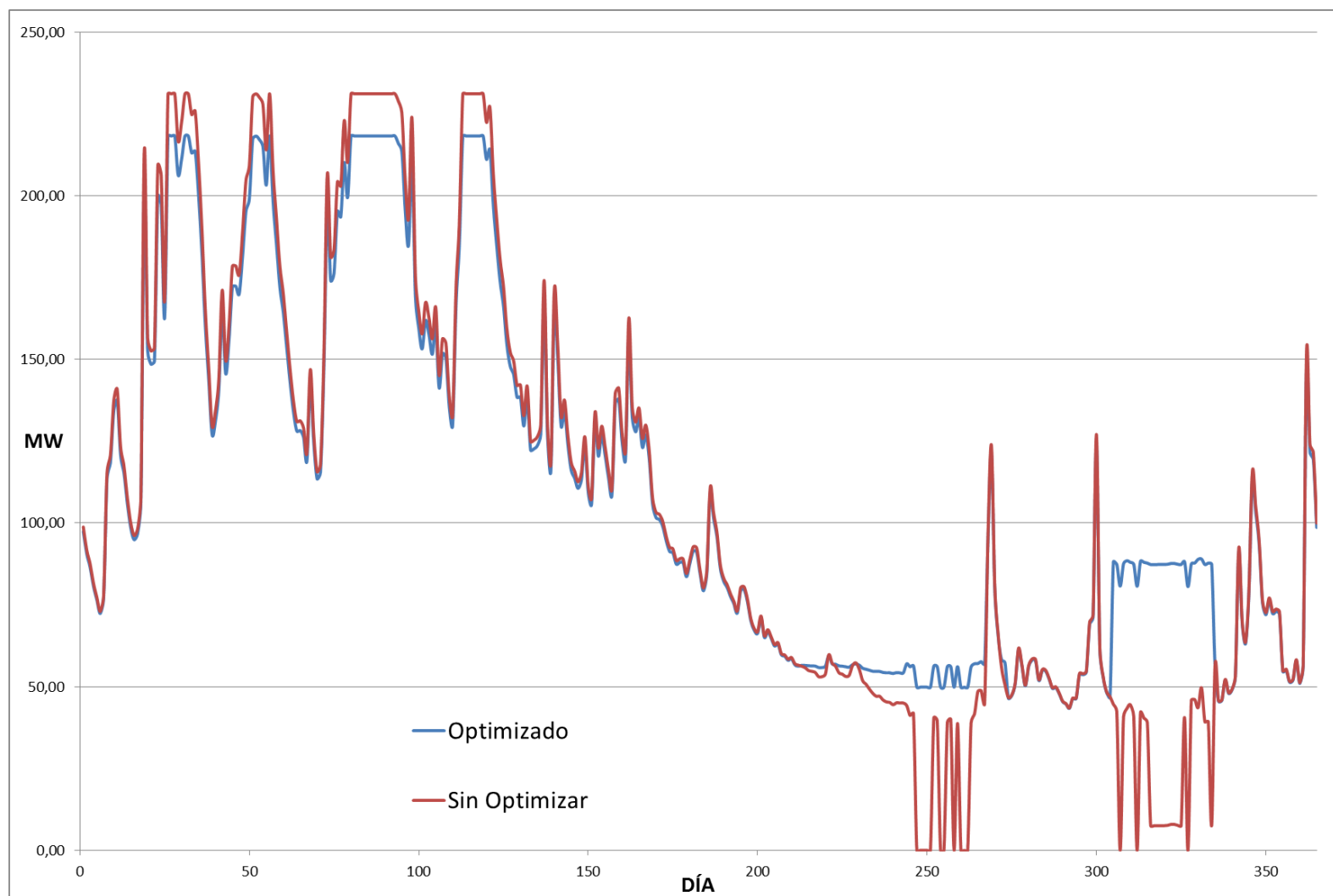
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 12



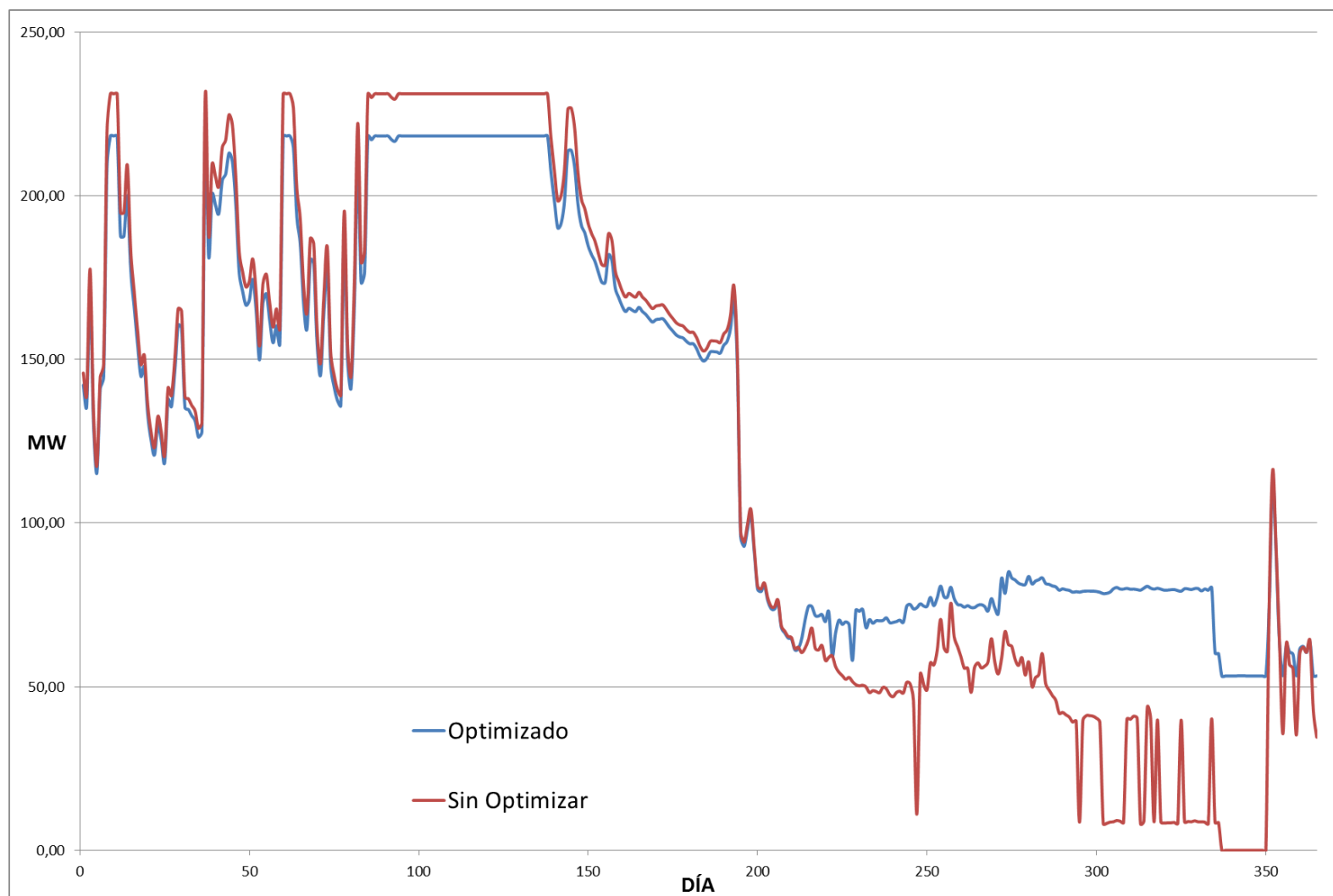
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 13



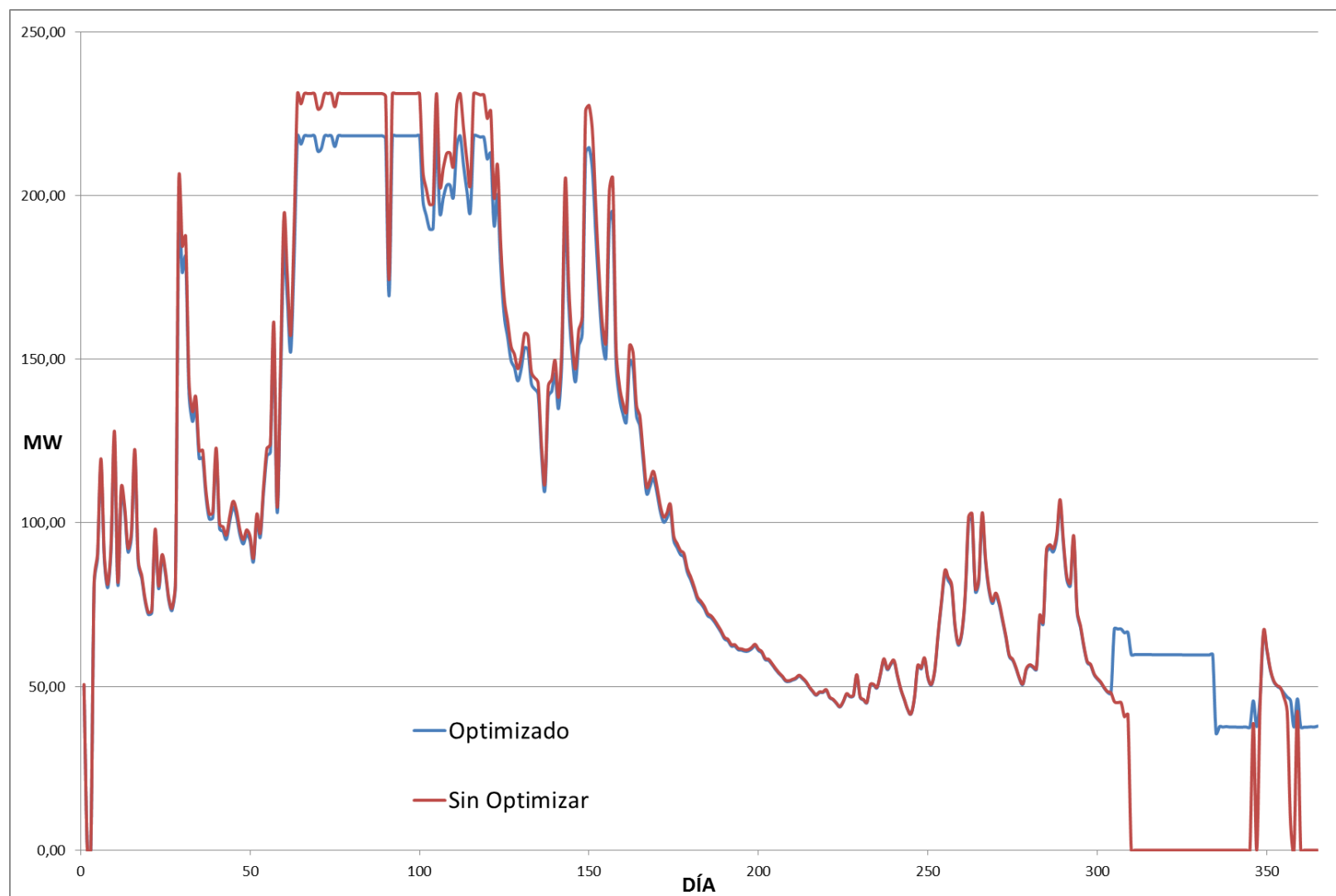
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 14



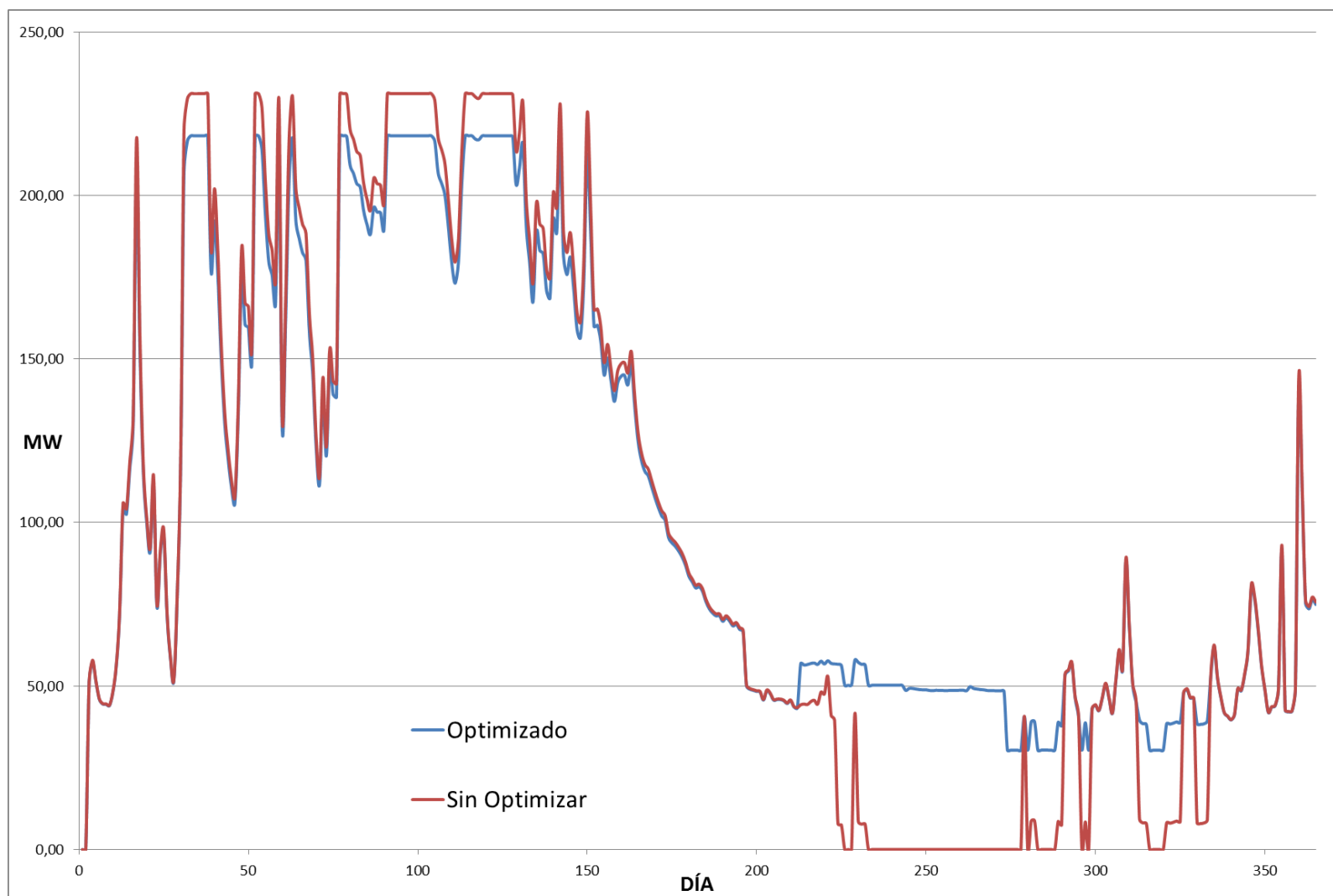
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 15



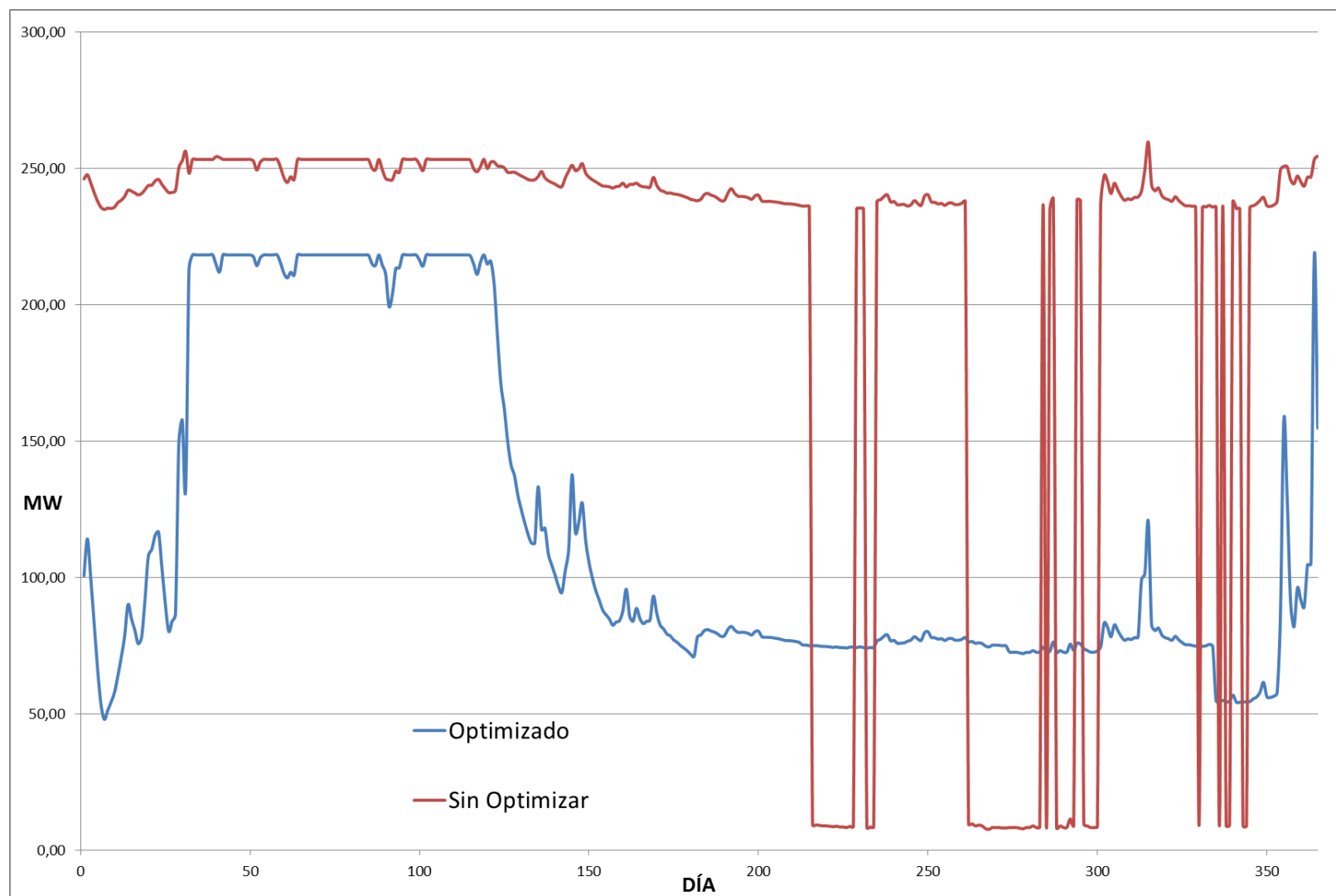
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 16



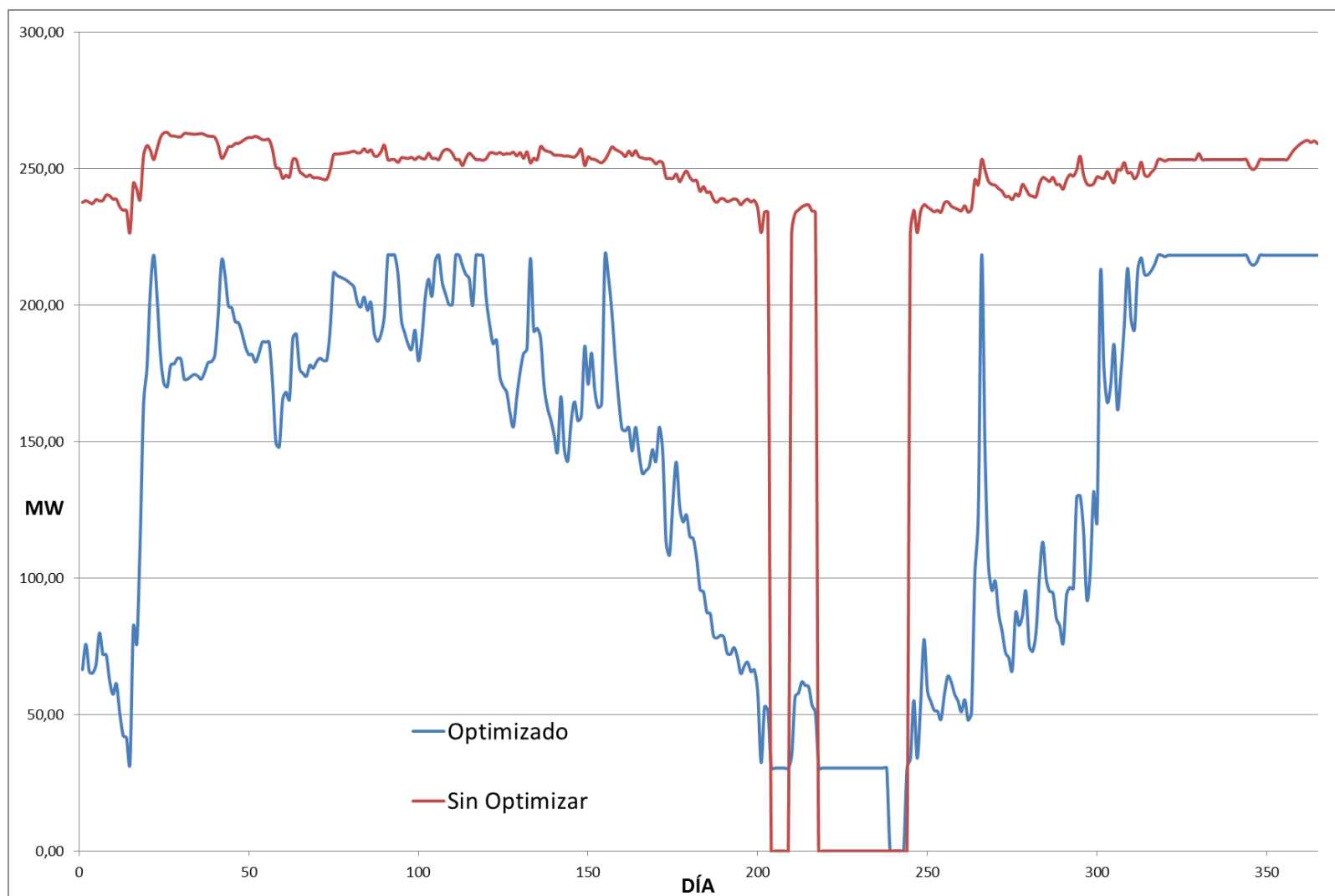
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 17



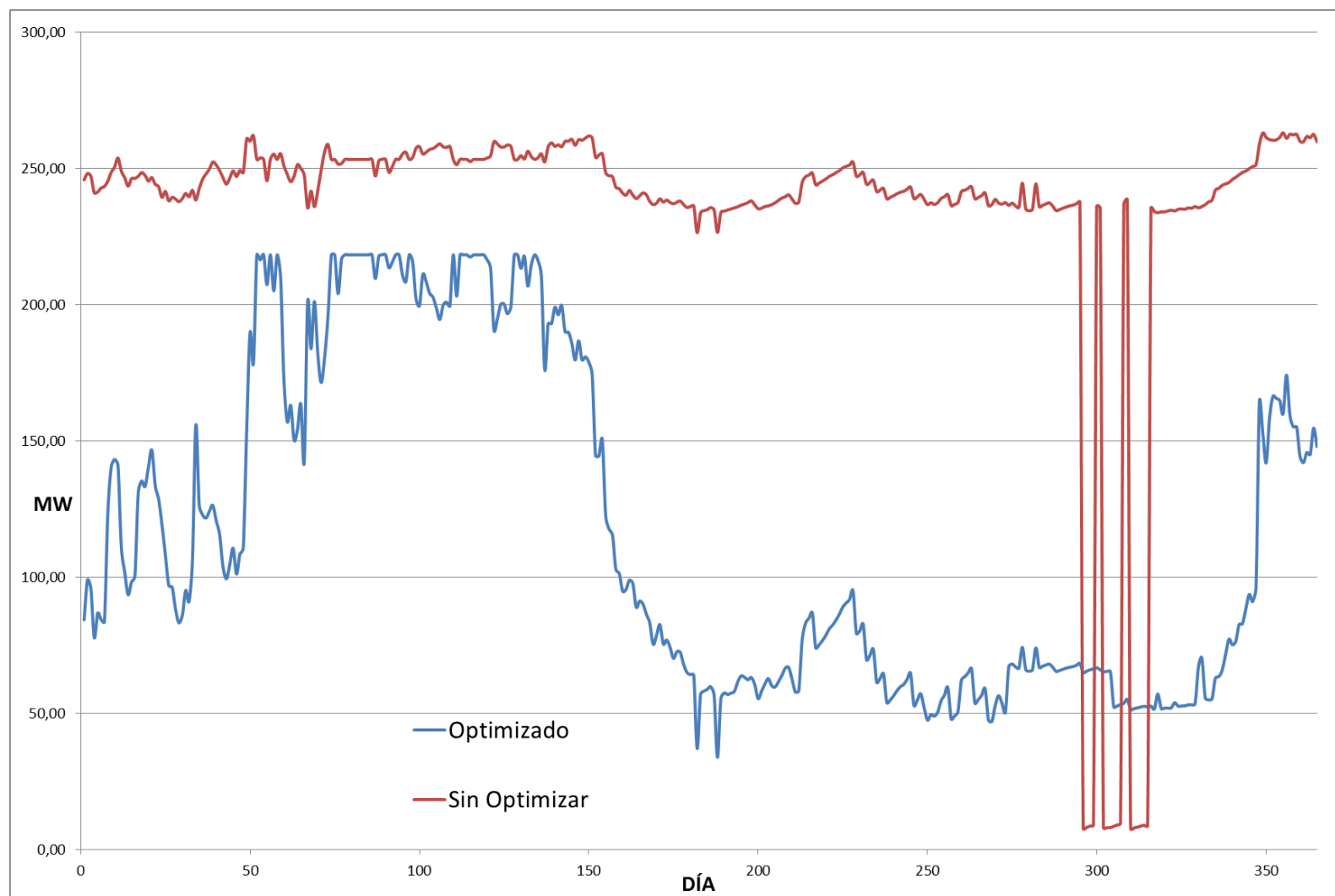
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 18



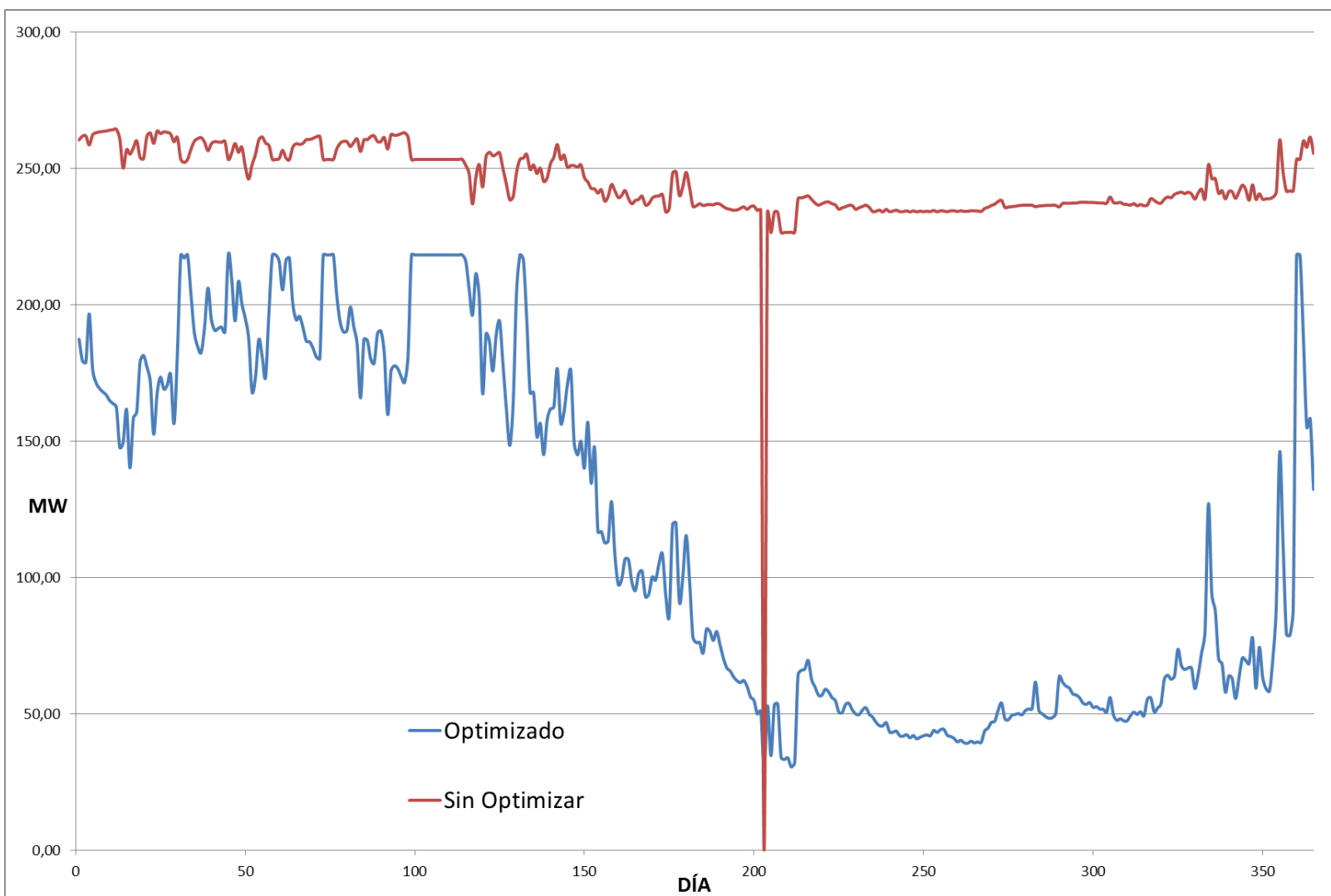
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 19



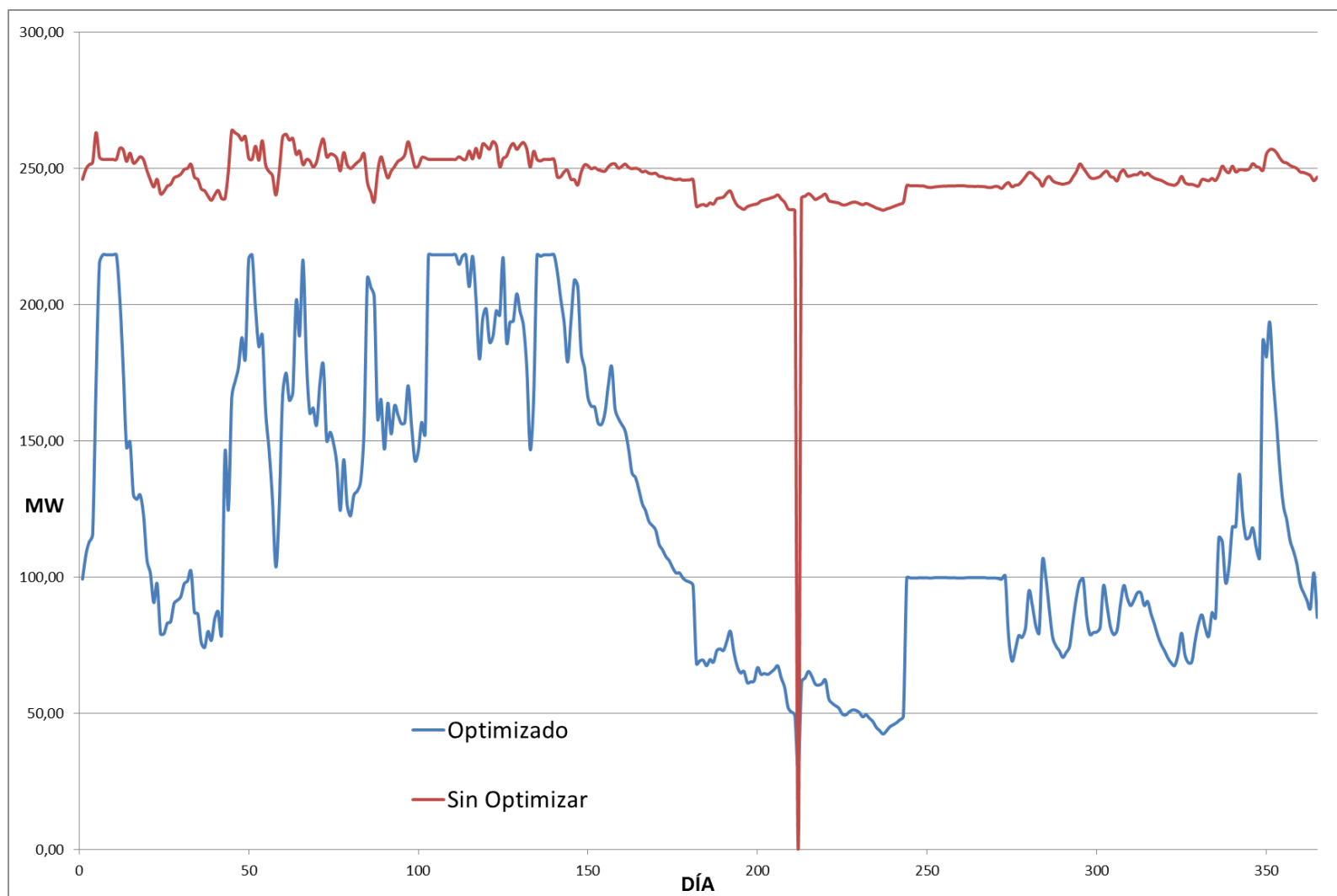
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 20



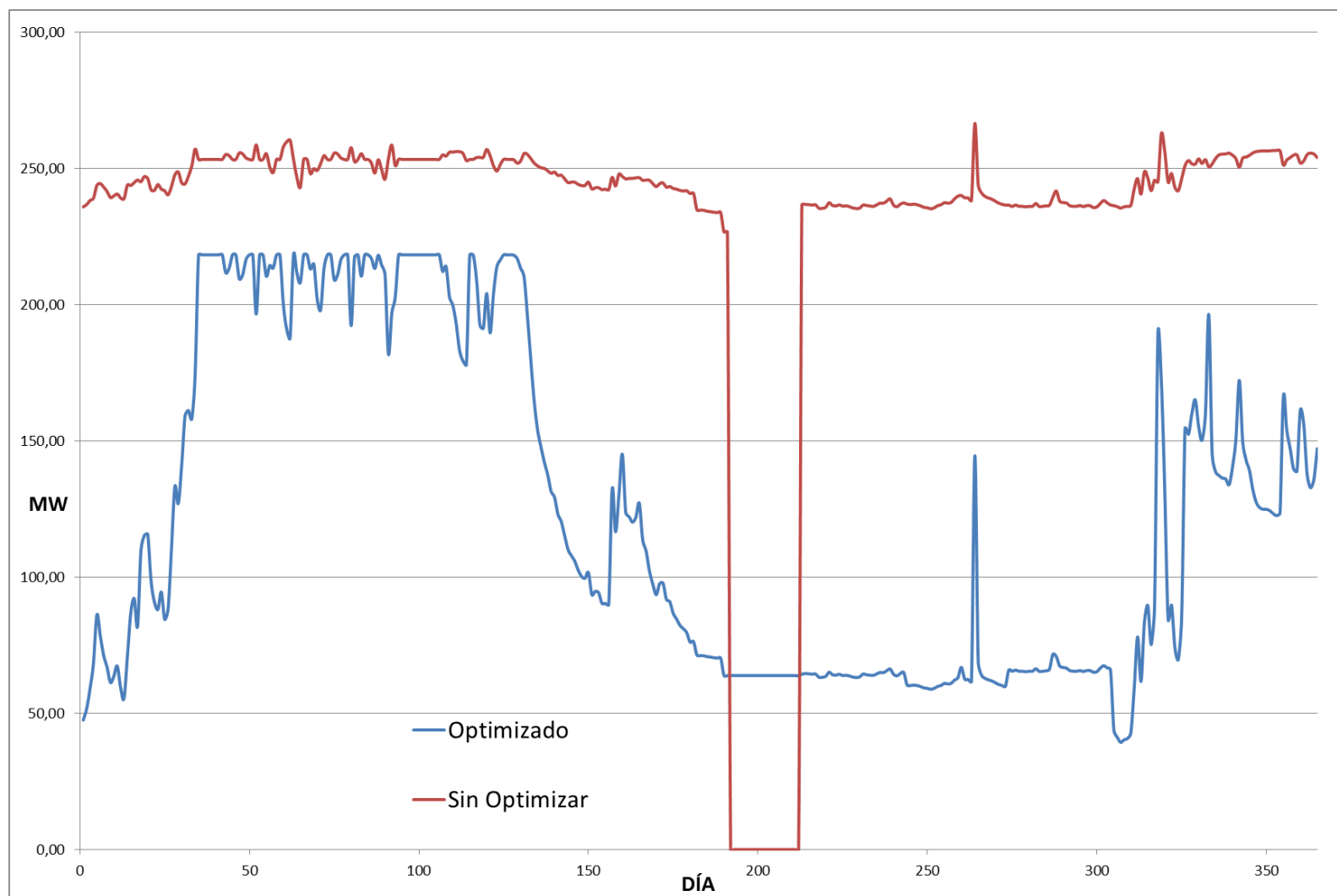
Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 21



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

Anexo : Serie histórica del año 22



Fuente: Elaborado por el autor en base a información técnica y planos provistos por HIDROTOAPI S.A.

BIBLIOGRAFÍA

Bellman, R. E. & Dreyfus, S. E. (1962). *Applied Dynamic Programming* (4a. ed.). New Jersey: Princeton University Press.

Smith, R. A. & Amisial, R. A. (Junio de 1983). *Operación de Embalses Mediante el Uso de la Programación Dinámica*. Mérida: CIDINT.

Chow, V. T. (Marzo de 2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Colombia: Nomos S.A.

Crespo, J. E & Flory L. J. *Modelos Para la Optimización de Embalses*.

HIDROTOAPI S.A. (2010). *Memoria Técnica Diseño Hidráulico Captación Pilatón*. Santo Domingo de los Colorados.

HIDROTOAPI S.A. (2010). *Sistema Hidráulico Cálculo de los transientes*. Santo Domingo de los Colorados.

HIDROTOAPI S.A. (2010). *Cálculo energético y Evaluación Económica*. Santo Domingo de los Colorados.

Navas, C. *Conceptos Básicos Sobre Generación y Consumo*. Centrales Hidroeléctricas. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 2014.

Navas, C. *Tipos de Generación y Fuentes de Energía*. Centrales Hidroeléctricas. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 2014.

Navas, C. *Conceptos Básicos Sobre Generación y Consumo*. Centrales Hidroeléctricas. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 2014.

Navas, C. *Potencial Hidroeléctrico de un Río*. Centrales Hidroeléctricas. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. 2014

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (s.f.). *Toachi Pilatón*. Recuperado el 2 de julio de 2015, de <http://www.energia.gob.ec/toachi-pilaton/>

CELEC E.P (2014). *Toachi Pilatón*. Recuperado el 14 de septiembre de 2015, de <https://www.celec.gob.ec/hidrotoapi/>